



UNIVERSIDADE DO VALE DOTAQUARI - UNIVATES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*
DOUTORADO EM AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO

**INTERPRETAÇÕES PALEOAMBIENTAIS COM BASE EM PADRÕES
ANATÔMICOS DE LENHOS FÓSSEIS**

José Rafael Wanderley Benício

Lajeado, janeiro de 2019

José Rafael Wanderley Benício

INTERPRETAÇÕES PALEOAMBIENTAIS COM BASE EM PADRÕES ANATÔMICOS DE LENHOS FÓSSEIS

Tese de Doutorado apresentada no Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como exigência para obtenção do título de Doutor em Ambiente e Desenvolvimento na linha de pesquisa Ecologia.

Orientador: Prof. Dr. André Jasper

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Etienne Fabbrin Pires Oliveira

Lajeado, janeiro de 2019



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO -
NÍVEL DOUTORADO

ATA 03/2019 – Defesa de Tese

A tese do doutorando **José Rafael Wanderley Benício** sob título "INTERPRETAÇÕES PALEOAMBIENTAIS COM BASE EM PADRÕES ANATÔMICOS DE LENHOS FÓSSEIS", foi defendida em sessão pública no dia 28 de fevereiro de 2019, às 14h, na sala 302, prédio 7 da Univates, tendo sido considerada APROVADA (aprovada/reprovada) pela Banca Examinadora, abaixo assinada, conforme pareceres individuais anexos, parte integrante desta ata, — (em caso de reprovação, preencher "não") estando apto a receber o diploma de Doutor em Ambiente e Desenvolvimento.

Banca Examinadora:

Nome

Assinatura

Orientador: Dr. André Jasper

Coorientadora: Dra. Etiene Fabbrin Pires Oliveira

3º Membro: Dra. Cristina Moreira Félix

4º Membro: Dra. Karen Adami Rodrigues

5º Membro: Dr. Eduardo Périco

Secretário da sessão:

Mariana Huppel

Secretária de Pós-Graduação *Stricto Sensu*,
por delegação de competência da Reitoria da Univates
conferida pela Portaria 090, de 25/07/2018

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO – UNIVATES
Rua Avelino Tallini, 171, Universitário – 95900-000 Lajeado, RS Brasil – Fone/Fax: 51. 3714-7000
e-mail: ppgad@univates.br home-page: www.univates.br/ppgad

*À minha **mãe**, mais dura que uma rocha, mais valiosa que um fóssil, um ser humano que vive para servir aos outros. Pelo seu amor às pessoas e não as coisas, uma super-heroína disfarçada de mulher comum.*

AGRADECIMENTOS

► À Fundação de Amparo à Pesquisa, **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código 001**, pela bolsa de doutorado concedida.

► À **coordenação** do Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento (PPGAD–Univates).

► Ao meu orientador Dr. **André Jasper**,

Pela confiança, acolhimento, contribuições e sugestões para a realização desta pesquisa. Foram anos de muito aprendizado e amadurecimento, que irei levar para toda vida. Agradeço imensamente. C'est la vie.

► À minha Coorientadora, Dr^a. **Etiene Fabbrin Pires**,

Por acreditar no magrelo com apelido esquisito, e por todo apoio prestado durante todos estes anos de imersão na pesquisa. Sou grato!

► Ao professor Dr. **Dieter Uhl**,

Pela colaboração científica de grande importância nos trabalhos realizados desde do mestrado, e cordial recepção no Senckenberg. Danke.

► À querida professora Dr^a. **Margot Guerra-Sommer**,

Pelo incentivo científico e empolgantes conversas e discussões sobre paleobotânica, uma de suas paixões.

► À minha família, **Raquel; Francisco; Ediel, Silmara; Leia, Henrique; João, Dezyree, Guilherme e Pedro Lucas**.

Mãe, Pai, irmãos, cunhados e sobrinhos.

Mesmo com a distância impedindo-me de ser mais presente, sei que poderei contar sempre com o apoio de vocês. Amo todos imensamente.

► À minha companheira **Cristina**,

Pelo companheirismo e paciência, sua presença e falas positivas foram muito importantes para me manter nos trilhos. Tenho muito amor e admiração por ti.

► Ao amigo, **Rafael Spiekermann**,

Pela parceria e contribuições de trabalhos, nestes anos todos de convivência intensa e caótica. Valeu Manolo.

► A todos os amigos do **Rio Grande e Tocantins a fora**,

A amizade é um pilar essencial para enfrentar as dores e desfrutar as alegrias da demasiada vida humana, sem amigos a vida teria menos sentido.

► Ao **Laboratório de Paleobotânica e Evolução de Biomas**,

Em nome de todas as pessoas que fazem e fizeram parte deste espaço, pelas amizades, parcerias, contribuições e aprendizados. Valeu D+!

► À uma das maiores obras musicais, **Pink Floyd**,

Trilha sonora que te tira da zona de conforto, com seu sobe e desce de emoções, simplesmente instigante, fascinante, provocativo.

► Sem esquecer da **Beck's**, um cão e tanto,

“Às vezes, é preciso um cachorro com mau hálito, péssimos modos e intenções puras para nos ajudar a ver (Marley & Eu).”

Meu muito obrigado a todos!

“Quando contemplo as galáxias, teoria quântica, evolução ou tempo geológico, acho que sou movido por uma forma que um poeta iria reconhecer. Isso não quer dizer que eu escreva poesia. Não sou capaz, mas acho que a grande ciência é semelhante à grande arte. E será mais apreciada se mais pessoas a virem como poesia, arte ou música. ”

Richard Dawkins,

In: Unweaving the Rainbow.

SÚMULA/BIOGRAFIA

Biólogo formado pela Universidade Federal do Tocantins (2010). Estagiário voluntário no Laboratório de Paleobiologia (UFT) (2007–2010). Bolsista, (Bolsa Permanência) (2010–2011). Bolsista, Apoio Técnico para Fortalecimento da Paleontologia Nacional, no Laboratório de Paleobiologia (UFT) (2012). Aluno do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Ambiente (PPGAD/UNIVATES), Mestrado, Bolsista FAPERGS (2013–2014), Doutorado, Bolsista PROSUC/CAPES (2015–2018).

Principais áreas de estudo: Paleontologia (Paleobotânica, Paleoclimatologia, Anatomia de Gimnospermas e Angiospermas).

RESUMO

Nas Ciências Ambientais, a construção do conhecimento ambiental deve integrar diferentes áreas, entre elas a adequada compreensão das características dos ecossistemas pretéritos. Estudos que analisem as características básicas da evolução do Sistema Terra ao longo do tempo, contribuem de forma significativa para entendimento das dinâmicas atuais. Tendo em vista que as plantas são excelentes marcadores ecológicos, a paleobotânica tem muito a contribuir nesse sentido, e os dados produzidos são fundamentais para um enfoque conceitual ampliado da área. Dentre as diferentes avaliações possíveis, o estudo das características de lenhos, constitui-se em excelente ferramenta para a inferência de variáveis paleoambientais predominantes quando do crescimento da planta. Neste contexto, o presente estudo investigou as características anatômicas de lenhos preservados por permineralização ou carbonização provenientes do Permiano das bacias do Parnaíba e do Paraná, além de um lenho permineralizado do Plioceno-Pleistoceno do Rio Grande do Sul com a finalidade de construir inferências paleoambientais para os sistemas deposicionais em que se formaram. O material proveniente da Formação Touro Passo, foi associado a Subfamília Mimosoideae (Fabaceae), e nomeado como *Itaquixylon heterogenum*. Já o material proveniente do Permiano da Bacia do Parnaíba, tem afinidades gimnospermicas, e permitiu confirmar a predominância de um clima semi-árido para a área de estudo. Por fim, o material proveniente do Permiano da Bacia do Paraná, se constituem de fragmentos de *macro-charcoal* investigados para o afloramento Porongos, e fornecem a primeira evidência da ocorrência de recorrentes paleoincêndios vegetacionais durante os depósitos da camada de carvão Barro Branco. Já os fragmentos carbonizados coletados no afloramento Barrocada, fornecem a primeira evidência de paleoincêndios vegetacionais para o Grupo Itararé. A integração dos dados advindos das diferentes áreas e idades, permitiu estabelecer que o estudo da anatomia de lenhos fósseis, independente da sua forma de preservação, é uma ferramenta imprescindível para a definição das características dos sistemas em que foram depositados e, portanto, sempre que possível devem ser considerados em estudos voltados à compreensão da evolução do Sistema Terra ao longo do tempo. Além disso, independentemente da idade e origem dos registros,

reforça-se a necessidade de utilização de dados advindos da paleobotânica para a compreensão dos processos envolvidos nas dinâmicas dos ambientes atuais.

Palavras-chaves: *charcoal*; lenhos permineralizados; evolução de biomas; paleobotânica; paleoambiente; paleoecologia; Gondwana

ABSTRACT

In Environmental Sciences, the construction of environmental knowledge must integrate different areas, among them the proper understanding of the characteristics of the past ecosystems. Studies that analyze the basic characteristics of the evolution of the Earth System over time, contribute significantly to understanding the current dynamics. Considering that plants are excellent ecological markers, paleobotany has much to contribute in this sense, and the data produced are fundamental to an extended conceptual approach of the area. Among the different possible evaluations, the study of wood characteristics is an excellent tool for the inference of paleoenvironmental variables predominant when plant growth occurs. In this context, the present study investigated the anatomical characteristics of woodlands preserved by permineralization or carbonization from Permian of the Parnaíba and Paraná basins, as well as a permineralized wood from Pliocene-Pleistocene Rio Grande do Sul in order to construct paleoenvironmental inferences for the depositional systems in which they were formed. The material coming from the Touro Passo Formation, was associated to the Subfamily Mimosoideae (Fabaceae), and named as *Itaquixylon heterogenum*. On the other hand, the material from Permian of the Parnaíba Basin has gymnospermic affinities, and confirmed the predominance of a semi-arid climate for the study area. Finally, the material coming from the Permian of the Paraná Basin, consisted of macro-charcoal fragments investigated for the Porongos outcrop, and provide the first evidence of the occurrence of recurrent vegetation paleoincidences during the deposits of the Barro Branco coal layer. The carbonized fragments collected in the Barrocada outcrop provide the first evidence of vegetative paleoincidences for the Itararé Group. The integration of data from different areas and ages allowed us to establish that the study of the anatomy of fossil wood, regardless of its form of preservation, is an essential tool for defining the characteristics of the systems in which they were deposited and, therefore, whenever should be considered in studies aimed at understanding the evolution of the Earth System over time. In addition, regardless of the age and origin of the records, the need to use data from paleobotany to understand the processes involved in the dynamics of current environments is reinforced.

Keywords: evolution of biomes; environmental dynamics; Paraná Basin; Parnaíba Basin; Gondwana

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 1

- 1 Lenho gimnospérmico fóssil, com crescimento lenhoso evidente (zonas de crescimento)
- 2 Relação entre temperatura de queima e refletância. Dados obtidos por meio de experimento controlado da relação entre valores de temperatura e refletância (em óleo) na formação de *macro-charcoal* para 24 horas de queima
- 3 Elementos necessários para ignição e manutenção do fogo. (Triângulo do fogo)
- 4 *Macro-charcoal*, visto a olho nu. a) fragmento de *macro-charcoal* proveniente do afloramento Porongos, em Santa Catarina (seta branca), b) *macro-charcoal* visto sob lupa
- 5 *Macro-charcoal* visto sob microscopia eletrônica de varredura (a - b), corte transversal, com detalhes das paredes celulares homogeneizadas (setas brancas)
- 6 Tipos de incêndios e formas de transporte para o *macro-charcoal*
- 7 Distribuição das descrições de ocorrências de paleoincêndios vegetacionais durante o Permiano do Gondwana (Cisuraliano)

CAPÍTULO 2

PALAEOCLIMATIC INFERENCES BASED ON DENDROLOGICAL PATTERNS OF PERMINERALIZED WOOD FROM THE PERMIAN OF THE NORTHERN TOCANTINS PETRIFIED FOREST, PARNAÍBA BASIN, BRAZIL

- 1 Field impressions from the Northern Tocantins Petrified Forest: a overview of the Tocantins Fossil Natural Monument showing the fossil loosely on the ground, b sample UFT 668 before collection. The gymnosperm stem was lying loosely on the ground, characteristic for the majority of the fossils from the Northern Tocantins Petrified Forest (256)
- 2 Map of Tocantins, showing the location of the Tocantins Fossil Trees Natural Monument area (TFTNM, rectangle in northeastern of Tocantins). MA Maranhão, PA Pará, MT Mato Grosso, GO Goiás, BA Bahia (adapted from Tavares et al. 2014) (257)
- 3 Lithological units exposed in the Tocantins Fossil Trees Natural Monument (adapted from Góes and Feijó 1994) (258)
- 4 The Tocantins Fossil Natural Monument (TFTNM) showing position of the individual sampling points (259)
- 5 Permineralized gymnosperms from Northern Tocantins Petrified. Forest presenting well preserved growth increments: a UFT 1001; b UFT 978; c UFT 978; d UFT 941 (261)
- 6 Microscopic images of growth zones; a UFT 976; b UFT 947; c UFT 1001: arrows point to boundaries of growth zones; d UFT 1001: no abrupt transition from late wood and early wood visible (arrow) (262)

CAPÍTULO 3

A NEW FOSSIL FABACEAE WOOD FROM THE PLEISTOCENE TOURO PASSO FORMATION OF RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL

- 1 Map of westernmost part of Rio Grande do Sul showing the position of the sampling locality (star). Adapted from Oliveira and Kerber (2009) (252)
- 1 Field photograph of the sampling locality, together with a schematic profile. Stratigraphic horizon from which the fossil wood fragment was extracted (white arrow) (Modified from Pires and Da Rosa 2000) (253)
- 2 Longitudinal (A) and lateral (B) views of the fossil wood (UFSM 12032), highlighting the preservation of growth rings (253)
- 3 Wood anatomical details of *Itaquixylon heterogenum* gen. nov. et sp. nov. Cross sections 1. Small core with fractures incrustated by quartz; distinct growth rings and diffuse porosity. 2. Solitary to multiple vessels, some of them with tyloses (arrow indicates twin vessel). 3. Detail of vessels with scanty paratracheal and vasicentric axial parenchyma (arrow). Tangential section 4. Small alternate vested intervessel pits. 5. Detail of the alternate vested intervessel pits, with lenticular aperture (arrow) Cross section 6. Presence of tyloses (arrow) (263)
- 4 Wood anatomical details of *Itaquixylon heterogenum* gen. nov. et sp. nov. Tangential sections 1. Uniseriate (low and narrow rays) and biseriate rays (arrow). 2. Rectangular axial parenchyma cells directly adjacent to a vessel (arrow). 3. Detail of rays. Radial sections 4. Heterocellular ray with one or two rows of square/upright marginal cells. 5. Detail of the heterocellular ray showing prismatic crystals (arrow). 6. Detail of prismatic crystal in the marginal square ray cells (arrow) (264)

CAPÍTULO 4

RECURRENT PALAEO-WILDFIRES IN A CISURALIAN COAL SEAM: A PALAEOBOTANICAL VIEW ON HIGH-INERTINITE COALS FROM THE SIDERÓPOLIS MEMBER, RIO BONITO FORMATION, LOWER PERMIAN OF THE PARANÁ BASIN, BRAZIL

- 1 Map showing the location of the Paraná Basin in South America (A). Simplified geological map of the Paraná Basin, Brazil with major tectonic elements indicating the studied locality (B) (adapted from [89]. Detail of (Fig 1B) with the position of the Porongos Outcrop and adjacent areas (C)
- 2 General stratigraphical framework of the Rio Bonito Formation in Santa Catarina state (A) (extracted from [14]. Stratigraphical column of the Barro Branco locality (B)
- 3 Samples from the studied site containing macro-charcoal remains (White arrows): PBUMCN 1167 (A, B, C), 1164 (D), 1168 (E) and 1166 (F)
- 4 General views from the studied macro-charcoal under SEM: impregnation by pyrite, fragments extracted from samples PBUMCN 1165 (A) and 1164 (B). Well-preserved anatomical details, fragments extracted from samples PBUMCN 1168 (C, D). Homogenized cell walls, fragments extracted from PBUMCN 1165 (E) and 1168 (F)
- 5 Anatomical details of Porongos Charcoalified Wood Type 1. Tracheids exhibiting 1–2 seriate sub-oppositely to alternately arranged pitting (A, B, C). Bordered pits with an elliptical to narrow elongate elliptical shape (B, C). Apertures damaged by charring process, however apparently elliptical (B). Uniseriate rays with 2–7 cells in height (D). Homocellular rays bearing apparently procumbent cells (E). Homogenized cell walls (F). All fragments extracted PBUMCN 1168

- 6 Anatomical details of Porongos Charcoalified Wood Type 2. Tracheids with 1–4 seriate alternately arranged pitting (A, B). Bordered pits ranging in shape from circular to elliptical (A, B). Homocellular rays are homocellular with 3–12 procumbent cells in height (C, D). Araucarioid cross-field pitting composed of 5–8 pits per field (E). Homogenized cell walls (F). Fragments extracted PBUMCN 1163 (A, B, D, E, F) and 1167 (C)
- 7 Anatomical details of Porongos Charcoalified Wood Type 3. Transition between primary and secondary xylem (A). Primary xylem tracheids exhibiting contiguous narrow elongate scalariform pitting, and homogenized cell walls (B). Secondary xylem tracheids exhibiting 1-2 alternately arranged seriate pitting (C). Bordered pits ranging in shape from circular to elliptical (A, C). Homocellular rays with 2-4 procumbent cells in height (D). Araucarioid cross-field pitting composed of 5-8 alternately arranged bordered pits per field (E). Secondary xylem homogenized cell walls (F). Fragments extracted PBUMCN 1165 (A, C, D, E, F) and 1168 (B)
- 8 Maceral content of the six coal levels of the Barro Branco coal seam studied site (values available in Supplementary Material 1)
- 9 Global distribution of sedimentary charcoal and inertinites during the Lower Permian (adapted from [90], fig 3A). Dots represent number of described occurrences by basin and diameter varies according scale (detail of each occurrence in Supplementary Material 2 and 3)

CAPÍTULO 5

- 1 Location and profile of the Barrocada outcrop; (a) map showing the geographical location of the Barrocada outcrop; (b) lithostratigraphic profile of the Barrocada outcrop. Adapted from Cagliari et al., (2014)

- 2 Macro-charcoal remains from the Itararé Group. (a) small macro-charcoal fragment in medium-grey siltstone (white arrow); (b) tracheids bearing circular pitting (white arrow); (c and d) homogenized cell walls (white arrow); (d and e) shoot-like holes which might have been produced by fungal hyphae activity; (f) detail of the shoot-like holes (yellow arrow)

CAPÍTULO 6

- 8 Lenho gimnospérmico fóssil, com crescimento lenhoso evidente (anéis de crescimento)

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

PALAEOCLIMATIC INFERENCES BASED ON DENDROLOGICAL PATTERNS OF PERMINERALIZED WOOD FROM THE PERMIAN OF THE NORTHERN TOCANTINS PETRIFIED FOREST, PARNAÍBA BASIN, BRAZIL

- 1 Results of the analysis of the growth zones (260)

CAPÍTULO 3

A NEW FOSSIL FABACEAE WOOD FROM THE PLEISTOCENE TOURO PASSO FORMATION OF RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL

- 1 Anatomical features of Piptadenia group (Tortorelli 1956, Evans et al 2006 and InsideWood – on-line database at insidewood.lib.ncsu.edu/search; available since 2004, accessed on 15/10/2016)). Abbreviations: Growth rings: A – absent, D – distinct, I – indistinct, Radial multiples: R – rare (<10%), O – occasional (10–30%), F – frequent (30–60%), C – common (60–80%), VC – very common (>80%), Clusters: R – rare (<10%), O – occasional (10–30%), F – frequent (30–60%), C – common (60–80%), N – not observed, Septate fibers: P – present, N – not present, Axial parenchyma: A – aliform, V – vasicentric, S – scanty paratracheal, C – confluent, B – banded, Axial parenchyma confluent: N – not observed, R – rare, O – occasional, F – frequent, C – common, VC – very common, Number of vessels linked: number of vessels or groups of tangential vessels included in confluent parenchyma, Ray type: H – homocellular, He – heterocellular, Crystals: F – present in the fibers, A – present in axial parenchyma, R – presente in rays cells (255)
- 2 Comparison of the characters of the Mimosoideae fossil genera. Adapted from Gros (1992) (256)

CAPÍTULO 4

RECURRENT PALAEO-WILDFIRES IN A CISURALIAN COAL SEAM: A PALAEOBOTANICAL VIEW ON HIGH-INERTINITE COALS FROM THE SIDERÓPOLIS MEMBER, RIO BONITO FORMATION, LOWER PERMIAN OF THE PARANÁ BASIN, BRAZIL

- 1 Tab. 1. Summary of the anatomical characteristics of the Porongos Charcoalified Wood Types 1, 2 and 3

- 2 Tab. 2. Reflectance values of vitrinites and inertinites of the six coal levels studied here. Charring temperatures of inertinites calculated after [25]. Coal level (CL), Average (Avg), Standard deviation (SD), Minimum (Min), Maximum (Max) and number of measurements (n)

SUMÁRIO

DADOS DE IDENTIFICAÇÃO	XXIII
------------------------------	-------

APRESENTAÇÃO.....	XXIV
-------------------	------

CAPÍTULO 1

1	INTRODUÇÃO.....	26
2	PRESERVAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS ANATÔMICAS EM LENHOS FÓSSEIS.....	28
2.1	Lenhos permineralizados ou petrificados.....	28
2.2	Lenhos carbonizados.....	31
2.2.1	<i>Inertinitas como proxy de paleoincêndios.....</i>	<i>31</i>
2.2.2	<i>Macro-charcoal.....</i>	<i>36</i>
3	OBJETIVOS.....	41
3.1	Objetivo Geral.....	41
3.2	Objetivos específicos.....	41
	REFERÊNCIAS.....	42

CAPÍTULO 2

3 ARTIGO PUBLICADO

<i>Palaeoclimatic inferences based on dendrological patterns of permineralized wood from the Permian of the Northern Tocantins Petrified Forest, Parnaíba Basin, Brazil.....</i>	<i>53</i>
--	-----------

CAPÍTULO 3

4 ARTIGO PUBLICADO

<i>A new fossil Fabaceae Wood from the Pleistocene Touro Passo Formation of Rio Grande do Sul, Brazil.....</i>	<i>63</i>
--	-----------

CAPÍTULO 4

5 ARTIGO PUBLICADO

<i>Recurrent palaeo-wildfires in a Cisuralian coal seam: A palaeobotanical view on high-inertinite coals from the Lower Permian of the Paraná Basin, Brazil.....</i>	<i>78</i>
--	-----------

CAPÍTULO 5

6 ARTIGO SUBMETIDO

<i>The first evidence of palaeo-wildfire from the Itararé Group, southernmost portion of the Paraná Basin, Brazil.....</i>	<i>108</i>
--	------------

CAPÍTULO 6

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	127
7.1 CONCLUSÕES.....	133
REFERÊNCIAS.....	135
ANEXOS	139
ANEXO A – Artigo publicado em coautoria (2016)	140
ANEXO B – Artigo publicado em coautoria (2016)	141
ANEXO C – Artigo publicado em coautoria (2018).....	142
ANEXO D – Resumo expandido publicado (2015).....	143
ANEXO E – Resumo publicado em coautoria (2015).....	144
ANEXO F – Resumo publicado em coautoria (2015).....	145
ANEXO G – Resumo publicado em coautoria(2015).....	147
ANEXO H – Resumo publicado (2015).....	150
ANEXO I – Resumo publicado (2015).....	151
ANEXO J – Resumo publicado em coautoria (2015).....	154
ANEXO K – Resumo publicado em coautoria (2015).....	157
ANEXO L – Resumo publicado em coautoria (2015).....	158
ANEXO M – Resumo publicado (2016).....	162
ANEXO N – Resumo publicado em coautoria (2016).....	164
ANEXO O – Resumo publicado em coautoria (2016).....	165
ANEXO P – Resumo publicado em coautoria (2017).....	169
ANEXO Q – Resumo publicado em coautoria (2017).....	172
ANEXO R – Resumo publicado em coautoria (2018).....	174
ANEXO S – Resumo publicado em coautoria (2018).....	176
ANEXO T – Resumo publicado em coautoria (2018).....	179
ANEXO U – Resumo publicado em coautoria (2018).....	181
ANEXO V – Resumo publicado (2018).....	185

DADOS DE IDENTIFICAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento – Universidade do Vale do Taquari – Univates.

Área de concentração:

- Espaço, Ambiente e Sociedade

Linha de Pesquisa:

- Ecologia

Tema de interesse:

- Gênese e Evolução de Biomas Terrestres

APRESENTAÇÃO

A presente tese de doutorado atende ao que estabelece o Regimento do Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Taquari – Univates (Resolução 167/Reitoria/Univates de 10 de dezembro de 2012). Tendo em vista que, ao longo dos 48 meses de formação do autor, os resultados construídos com o desenvolvimento do projeto de tese formam compilados em artigos científicos (publicados ou submetidos), optou-se por construir este documento final com as versões originais das publicações como capítulos.

Assim, compõem esta tese de doutoramento os seguintes itens:

a) Introdução, onde o tema geral abordado é contextualizado e inserido na área de Ciências Ambientais;

b) Descrição Sucinta de Formas de Preservação Fóssil de Características Anatômicas de Lenhos, com uma abordagem teórica dos principais conceitos envolvidos;

c) Artigo publicado: O objetivo do trabalho foi reconstruir aspectos do clima regional durante a Permiano usando dados *proxy* obtidos a partir da análise de fósseis de gimnospermas preservadas no norte da Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional (FPTS). Foram estudados 32 fragmentos de lenhos fósseis gimnospérmicos, dos quais 682 incrementos de crescimento foram investigados usando os padrões de sensibilidade média e anual. Os resultados advindos dessas análises podem ser encontrados no **capítulo 2** deste documento; DOI: [10.1007/s12549-015-0218-8](https://doi.org/10.1007/s12549-015-0218-8)

d) Artigo publicado: O estudo se baseou na investigação de características anatômicas bem preservadas de um lenho silicificado da Formação Touro Passo, (Pleistoceno) do Rio Grande do Sul, Brasil. O fragmento media 16,6 cm de comprimento e 9,9 cm de diâmetro, com uma pequena medula parcialmente preservada. Com base no conjunto de caracteres analisados, foi proposto um novo fóssil-taxon para a formação. As descrições detalhadas advindas dessa pesquisa podem ser encontradas no **capítulo 3** deste documento;

DOI: [10.14446/FI.2016.251](https://doi.org/10.14446/FI.2016.251)

e) Artigo *submetido (a)*: A distribuição e abundância de *macro-charcoal* e inertinitas é considerado uma ferramenta confiável para interpretações dos regimes regionais e globais de paleoincêndios em ambientes deposicionais formadores de turfeiras. Dito isto, no presente estudo fornecemos a primeira análise detalhada do *macro-charcoal*/inertinitas para a camada de carvão Barro Branco, Formação Rio Bonito, Permiano Inferior, da Bacia do Paraná, Santa Catarina, Brasil. Nesta pesquisa, foram combinados resultados derivados de dados paleobotânicos e petrológicos, afim de obter maiores informações paleoambientais dos fragmentos carbonizados. Os resultados detalhados provenientes dessas análises podem ser encontrados no **capítulo 4** deste documento;

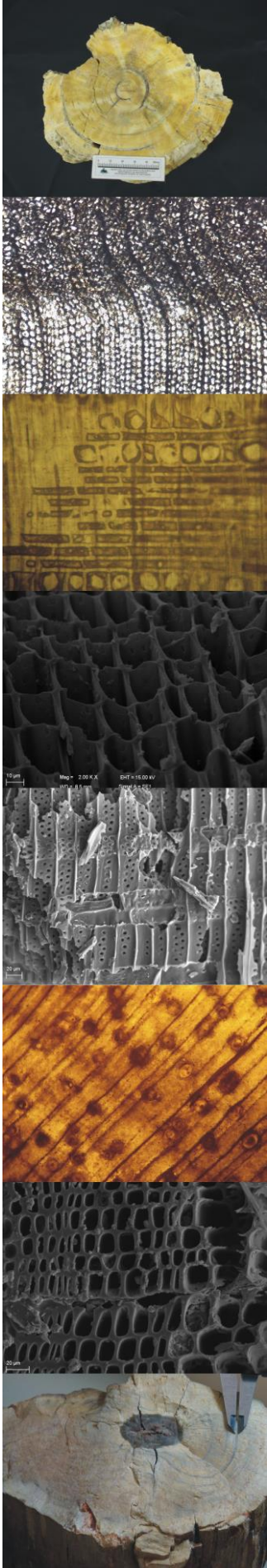
f) Artigo *submetido (b)*: Na presente comunicação, fornecemos a primeira descrição detalhada de *macro-charcoal* para o Grupo Itararé, Afloramento Barrocada, Bacia do Paraná, Rio Grande do Sul, Brasil. Se uma idade Pensilvaniano é assumida para o Grupo Itararé, esse registro de *macro-charcoal* provavelmente representa a primeira evidência de paleoincêndios vegetacionais para o Carbonífero do Gondwana. Entretanto, mais estudos relacionados ao *macro-charcoal* para o Grupo Itararé, bem como em depósitos contemporâneos de outras regiões do Gondwana, são necessários para lançar uma luz sobre a dinâmica destes eventos durante o Paleozoico Superior. As descrições detalhadas do estudo podem ser encontradas no **capítulo 5** deste documento;

g) Análise integrada dos dados produzidos ao longo do desenvolvimento do projeto de tese;

h) Conclusões gerais, baseadas na integração dos resultados e discussões apresentadas nos capítulos;

i) Referências do texto integrador;

Anexos.



CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Considerando a concepção ampla de ambiente, baseada na visão noosférica de Vernadsky (1926) e na abordagem egocêntrica de Leopold (1949), a adequada compreensão das variáveis do meio (Biosfera), depende de estudos acerca das características dos ecossistemas pretéritos. A construção científica do conhecimento ambiental deve integrar diferentes áreas, cada uma contribuindo para o entendimento dos elementos que compõem as diversas esferas que constituem o Sistema Terra. Consequentemente, resultados básicos produzidos por segmentos que podem ser considerados pouco próximos às Ciências Ambientais, são de fundamental importância para o embasamento e consolidação das concepções acerca das condições globais atuais.

Nesse sentido, a paleobotânica é, originalmente, uma ciência multidisciplinar que se utiliza de fundamentos geológicos e biológicos para o estudo dos vegetais fósseis (TAYLOR; TAYLOR; KRINGS, 2009). Os resultados produzidos pelos estudos da área, incluindo aqueles que descrevem as características básicas das plantas que ocuparam os ambientes pretéritos do planeta, a transformam em uma ferramenta imprescindível para a compreensão das variações do Sistema Terra, principalmente ao longo do tempo (BEERLING, 2007).

Autores como Chaloner e Creber (1990), assim bem como Uhl e Mosbrugger (1999), argumentam que, desde os primórdios da paleobotânica, o potencial da utilização dos registros de plantas fósseis como *proxies* para a inferência de condições paleoambientais é reconhecido. Consequentemente, a definição de características morfológicas, anatômicas, fisiológicas e ecológicas desses organismos vem servindo de base para a compreensão das condições ambientais (locais, regionais, globais) atuais e pretéritas.

Um exemplo prático da importância dos estudos paleobotânicos para as Ciências Ambientais está relacionado aos desafios impostos pelas mudanças climáticas à comunidade global. Blois et al., (2013) destaca que o registro fóssil se constitui em oportunidade ímpar para o estudo dos ecossistemas, tendo em vista que o mesmo permite a ampliação das escalas temporal e geográfica dos processos

envolvidos. De forma mais enfática, Gastaldo, DiMichelle e Pfefferkorn, (1996) e Isbell et al., (2008), defendem que o único modelo confiável para as alterações climáticas atuais são os eventos registrados regional e globalmente em níveis do Paleozoico Superior. Conforme Gastaldo, DiMichelle e Pfefferkorn, (1996), apenas nesse intervalo a biodiversidade terrestre experimentou algo semelhante ao que o planeta poderá enfrentar em um futuro próximo.

Assim, além de subsidiar interpretações paleoambientais, o estudo detalhado dos registros fitofossilíferos possibilita a compreensão de processos evolutivos envolvidos nas origens da biodiversidade terrestre. A análise de plantas fósseis é, portanto, fundamental para o esclarecimento da origem dos grupos vegetais atuais, permitindo definir, na escala de tempo geológico, quais os momentos mais significativos para os diferentes grupos taxonômicos atuais (TAYLOR; TAYLOR; KRINGS, 2009).

White (1990) descreve a paleobotânica como a “(...) *janela por onde é possível olhar os corredores do tempo* (...)”, e defende que, por fornecer informações estruturais dos organismos vegetais, permite a definição do surgimento dos principais taxa. Ainda de acordo com White (1990), essa área da paleontologia serve de alicerce para a análise das sucessões florísticas e subsidia reconstituições paleobiogeográficas.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta informações acerca dos padrões anatômicos de lenhos fósseis de diferentes idades, preservados sob a forma de *macro-charcoal* e permineralizações. Estes dados permitiram a reconstrução das condições paleoambientais predominantes nas áreas de estudo quando da deposição do material, contribuindo, portanto, para a efetiva aplicação do conceito amplo de ambiente anteriormente citado.

2 PRESERVAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS ANATÔMICAS EM LENHOS FÓSSEIS

Apesar de os conceitos teóricos e metodológicos utilizados estarem descritos em cada um dos artigos e manuscritos apresentados, são referidos aqui os processos envolvidos na preservação de características anatômicas estudadas ao longo do desenvolvimento do projeto de tese.

2.1 Lenhos permineralizados ou petrificados

A madeira secundária produzida por gimnospermas e angiospermas é uma importante fonte de informações sobre ambientes passados e condições Paleoclimáticas, e, por muito, tempo tem sido utilizada como *proxy* para reconstruções paleoambientais (CREBER; CHALONER, 1985; CREBER; FRANCIS, 1999; SCHWEINGRUBER, 2001). A preservação das características anatômicas dos lenhos permineralizados mantém o registro das condições que ocorreram antes dos processos tafonômicos, ou mesmo durante o processo de permineralização (NOLL et al., 2003; UHL, 2004). Um bem conhecido exemplo é a presença ou ausência de incrementos de crescimento (Figura 1), que fornecem informações sobre mudanças sazonais das condições ambientais de onde a planta cresceu (SCHWEITZER, 1962; FALCON-LANG, 2003; FRANCIS; POOLE, 2002), ou mudanças não sazonais de condições, como as secas ocasionais (CREBER; FRANCIS, 1999; FALCON-LANG, 2003, PIRES et al., 2005, 2011, BENÍCIO et al., 2016a).

Figura 1. Lenho gimnospérmico fóssil, com crescimento lenhoso evidente (zonas de crescimento).



Fonte: Do Autor.

A interpretação literal para o termo *petrification* seria: espécime submetido à progressiva ação de litificação (MUSSA, 2004). Desta forma, a “petrificação” *sensu stricto* seria a total substituição da matéria orgânica por minerais (BUURMAN, 1972).

Os processos tafonômicos que permitem a permineralização celular (*sensu* SCHOPF, 1975) ocorre por meio da sílica, através de soluções saturadas em determinados íons, comumente carbonatos ou silicatos, que penetra nos espaços intercelulares e no lúmen da célula após o evento de deposição da madeira. Por processos intempéricos e microbiológicos, as células e os tecidos vão sendo decompostos; porém, antes da decomposição completa das paredes celulares, ocorre a precipitação de substâncias, a partir dos íons em solução, preservando a estrutura tridimensional do corpo vegetal sedimentado.

Para Carson (1991) a silicificação é um processo que se dá por meio do aumento da concentração de sílica com o tempo, após o sepultamento dos restos vegetais. Para o autor, a silicificação não é uma substituição, mas uma

permineralização de fato, na qual a estrutura orgânica age como uma “fôrma” para a deposição da sílica nas cavidades celulares. Para Röbller (2006) o processo de silicificação dos fósseis encontrados em Chemnitz Alemanha, se deu por meio da ação de fluídos ricos em sílica, originários dos sedimentos vulcânicos, que preencheram as células dos fragmentos caulinares, tendo como consequência a geração de formas de polimorfos de quartzo densos, preservando estruturas anatômicas tridimensionais.

Um dos importantes repositórios naturais de lenhos fossilizados são as Florestas Fossilizadas, as quais, por beleza e importância científica, têm sido convertidas em áreas de proteção, unidades de conservação, monumentos estaduais e nacionais, além de parques nacionais. Estes vêm sendo criados em diversos países, o que reflete o nível de importância que as diferentes sociedades dão a estas ocorrências (DIAS-BRITO et al., 2007).

No Brasil, merecem especial interesse e atenção (devido à quantidade e qualidade de preservação dos fósseis) dois registros de florestas petrificadas:

a) A Floresta Petrificada de Mata, localizada no Rio Grande do Sul e que aflora principalmente nos municípios de São Pedro do Sul e Mata, ao sul da Bacia do Paraná. Os fósseis são encontrados inclusos no Arenito Mata, relacionado a um sistema fluvial entrelaçado, ou encontram-se rolados sobre sedimentos de diferentes idades, na forma de fragmentos de pequeno e grande porte (GUERRA-SOMMER; SCHERER, 2002). Os lenhos fósseis consistem em formas gimnospérmicas, relacionadas a coníferas representando provavelmente uma flora mesofítica, originada por mudanças climáticas iniciadas na passagem Meso-Neotriássica (GUERRA-SOMMER; SCHERER, 2002; PIRES; GUERRA-SOMMER; SCHERER, 2005).

b) A Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional (FPTS), localizada no estado do Tocantins, possui uma singular assembleia fitofossilífera permiana, com espécies comuns a diferentes províncias paleofitogeográficas, como a Flora Euramericana e Gondwânica (RÖßLER; GALTIER, 2003; RÖßLER 2006), em especial a Flora *Glossopteris*, na Bacia do Paraná (ROHN; RÖßLER 1986; TAVARES et al., 2006).

Em relação aos fragmentos lenhosos que compõem estas florestas petrificadas, algumas características anatômicas destas plantas podem ser preservadas, uma delas, que se constitui em uma importante ferramenta para inferências paleoclimáticas, são os anéis ou zonas de crescimento. Os fatores que influenciam a geração destes incrementos de crescimento ainda não estão totalmente esclarecidos (KUMAGAI; MATSUNASA, 1995). O crescimento lenhoso é controlado por uma combinação complexa de fatores relacionados ao clima, dessa forma, análises quantitativas e qualitativas do crescimento arbóreo são informações de alta resolução de ambientes pretéritos (GERARDS; YANS; GERRIENE, 2007).

Segundo Vaartaja (1959) e Larson (1969), os anéis de crescimento em madeiras são gerados no xilema secundário, através da regulação da atividade cambial, após um período de dormência relacionada a ritmos endógenos associados a respostas ao foto-período. A presença desses anéis constitui um padrão constante em zonas temperadas durante amplos ciclos globais de *icehouse*, quando os polos estavam recobertos por calotas polares.

Para Schweingruber (1992, 1996), anéis de crescimento podem ser registrados em todos os climas, sendo que a frequência de espécimes que os apresentam nas diferentes latitudes está relacionada à sazonalidade. Schweingruber (1996) relaciona tipos de climas e a formação de anéis de crescimento ou incrementos de crescimento através de estudos com lenhos atuais da Europa, África, Austrália e América do Norte.

Na Formação Rio Bonito, na Bacia do Paraná no estado de Santa Catarina, Mayer (1989) analisou os aspectos anatômicos de lenhos gimnospérmicos gondwânicos com base no crescimento lenhoso e em parâmetros de "sensibilidade anual" e "sensibilidade média". O autor verificou as condições paleoclimáticas predominantes, levando-se em conta o posicionamento amplo das associações estudadas, dentro das gimnospermas, sem a necessidade de classificação específica.

2.2 Lenhos carbonizados

2.2.1 Inertinitas como proxy de paleoincêndios

As Inertinitas são definidas como um grupo maceral que apresenta alta refletância, pouca ou nenhuma fluorescência, forte aromatização, alto conteúdo de carbono e baixo conteúdo de hidrogênio (TEICHMÜLLER, 1989). Os carvões permianos, especialmente no Gondwana, mostram um alto conteúdo de inertinitas (HUNT, 1989; TAYLOR et al., 1998; DIESEL, 2010). A maioria destas inertinitas são fusinita e semifusinita (DIESEL, 2010) e apresentam as mesmas características anatômicas que o *macro-charcoal* (SCOTT, 2010). Embora uma origem de paleoincêndios tenha sido amplamente aceita (e.g. SCOTT, 1989; DIESEL, 2010; GLASSPOOL e SCOTT, 2010; JASPER et al., 2013; BENÍCIO et al., *submetido, a*) ainda existem controvérsias sobre a gênese deste grupo maceral (TAYLOR et al., 1989; HUNT, 1989; HOWER et al., 2009).

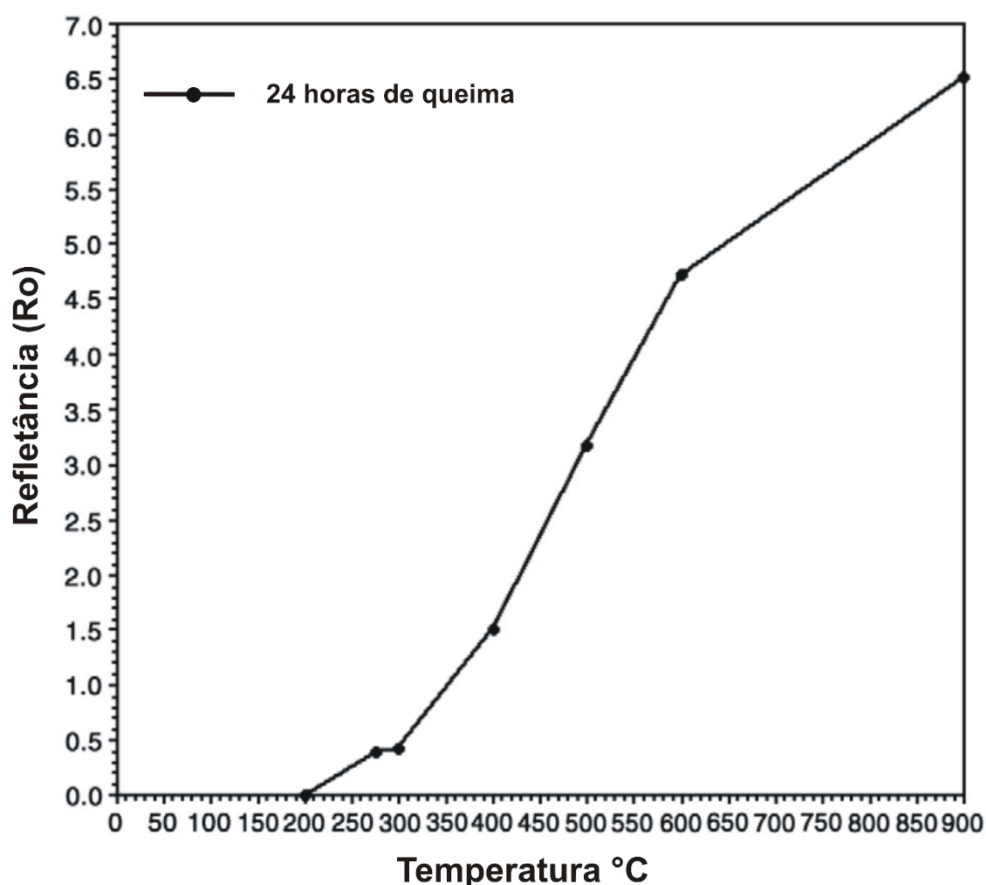
A presença de grandes quantidades de inertinitas em carvões do Paleozoico Superior já foi atribuída a diferentes fatores, tais como exposição subaérea, deposição em clima frio e atividade fúngica (GLASSPOOL, 2003). Todavia, a homologia das características físicas e químicas entre inertinitas e *macro-charcoal* atual levou ao reconhecimento de que ambos são equivalentes. Apesar das controvérsias, até agora nenhum outro processo além da carbonização foi demonstrado experimentalmente como capaz de produzir *macro-charcoal* (JASPER et al. 2013). Desta forma, considerando experimentos recentes que mostram as semelhanças entre inertinitas e *macro-charcoal* (SCOTT e GLASSPOOL, 2007; MORGA; JELONEK; KRUSZEWSKA, 2014), além da estreita ligação entre a distribuição estratigráfica das inertinitas e a variação dos níveis de oxigênio paleoatmosféricos (SCOTT, 2000; DIESEL, 2010; GLASSPOOL e SCOTT, 2010), tem-se argumentado com propriedade que a maioria das inertinitas, especialmente fusinita e semifusinita, são originados pela atividade do fogo.

No entanto, a aceitação dessa afinidade tem ocorrido de forma gradual (SCOTT; GLASSPOOL, 2007). Na atualidade, é amplamente aceita a ideia de que toda a inertinita representa *macro-charcoal* originado por paleoincêndios (e.g. SCOTT; GLASSPOOL, 2007; DIESEL, 2010; GLASSPOOL; SCOTT, 2010; SCOTT, 2010; HUDSPITH, 2012; GLASSPOOL et al., 2015; JASPER et al., 2013; BENÍCIO et al., *submetido, a*).

A quantidade de inertinita no carvão pode ser utilizada para interpretar a história de paleoincêndios em escala local. Horizontes de fragmentos macroscópicos de fusinita e semifusinita provavelmente representam incêndios de superfície dentro do ambiente gerador da turfa, podendo gerar informações de curto transporte - por exemplo, hipoautóctone/autóctone - enquanto que *macro-charcoal* e *micro-charcoal*, disperso no sedimento, geralmente representam material alóctone de incêndios regionais transportados pelo ar ou pela água (HUDSPITH et al., 2012).

Segundo McParland et al., (2009), existe uma correlação positiva entre temperatura de formação do *macro-charcoal* e o valor de refletância da parede celular para inertinitas que permite estimar a temperatura de queima (Figura 2). Essa correlação foi mostrada experimentalmente por Guo e Bustin (1998) e Scott (2010). A determinação da temperatura de queima, em conjunto com as demais características do *macro-charcoal*, possibilita inferir informações relacionadas ao tipo predominante de queima e demais informações ecológicas relacionadas, como grau de dessecação ambiental e órgãos vegetais, preferencialmente.

Figura 2. Relação entre temperatura de queima e refletância. Dados obtidos por meio de experimento controlado da relação entre valores de temperatura e refletância (em óleo) na formação de *macro-charcoal* para 24 horas de queima.

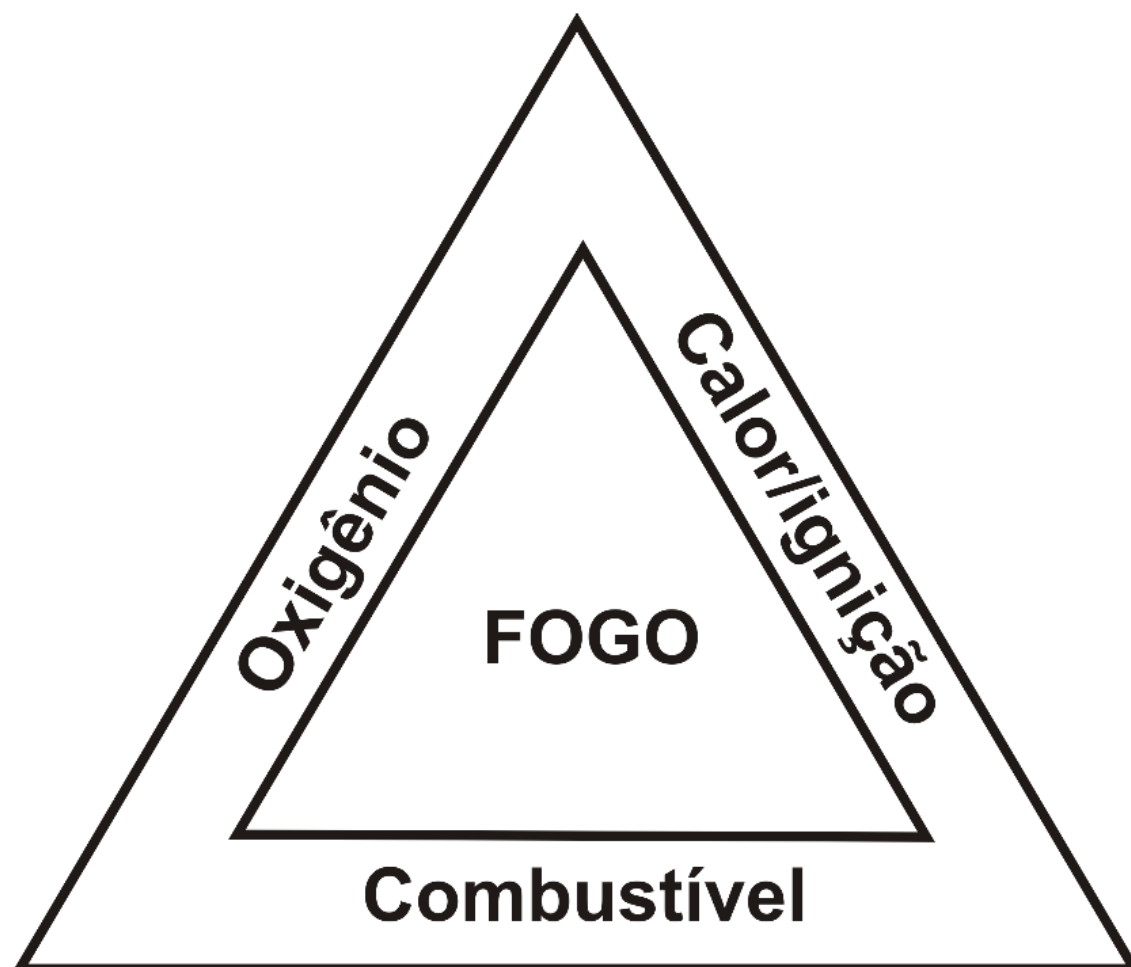


Fonte: Scott (2010), Fig. 7, p. 18.

Macro-charcoal apresentado valores de refletância maiores que 5 Ro% requerem altas temperaturas de queima ou tempo de exposição prolongado ao calor. Carvões com refletâncias abaixo de 1 Ro% podem ter sido formados sob temperaturas entre 300 e 400 °C. A temperatura de muitos tipos de incêndios cai nesse intervalo, concluindo-se que os carvões produzidos por temperaturas mais baixas terão valores de refletância menores, no intervalo da semifusinita. Logo, a refletância da fusinita é adquirida antes do processo de carbonificação e, portanto, independe da idade, litologia ou diagênese/ambiente geológico (SCOTT, 1989).

Contudo, quando relacionados os registros de inertinitas à presença de *macro-charcoal* (*sensu* Scott, 2000, 2010 – inertinitas e *macro-charcoal*) em níveis carbonosos de diferentes idades, esta se constitui em uma ferramenta confiável para a definição da ocorrência de eventos de paleoincêndios vegetacionais em sistemas formadores de carvão de diferentes idades e distribuição paleogeográfica (SCOTT, 2010). Considerando os condicionantes envolvidos na ocorrência desses eventos [fonte de ignição, disponibilidade de combustível (=biomassa) e níveis adequados de pO_2] (Figura 3), o estudo detalhado desse tipo de evento contribui consideravelmente para interpretações das condições paleoambientais predominantes no momento de sua formação (ABU HAMAD et al., 2012).

Figura 3. Elementos necessários para ignição e manutenção do fogo. (Triângulo do fogo).



Fonte: BERNER; COLLINSON; SCOTT, 2013, Fig. 12.2, p. 232.

2.2.2 Macro-charcoal

O fogo é um importante elemento que atua na dinâmica e modificação de diferentes ecossistemas desde o surgimento das primeiras plantas terrícolas, atuando como modelador da vegetação (e.g. PYNE, 1982; GLASSPOOL; EDWARDS; AXE, 2004; BOWMANN et al, 2009; PAUSAS; KEELEY, 2009). Os incêndios são importantes modeladores de diferentes ambientes modernos, podendo ser comparados à herbivoria em termos de impacto sobre a vegetação (BOWMAN et al., 2009; FLANNIGAN et al., 2009; PRESTON; SCHMIDT, 2006; BOND; KEELEY, 2005).

Van Bellen et al., (2012), analisando carvões Holocênicos do Hemisfério Norte, concluíram que as florestas boreais sofreram forte influência dos incêndios, que foram pouco frequentes, mas grandes em extensão, diminuindo em direção ao presente, e relacionam a ecologia do fogo aos fatores ambientais como regimes de precipitação e temperaturas. Para Crutzen, Goldammer (1993) e Pyne (1995), os efeitos do fogo nos ambientes terrícolas são muitas vezes devastadores, levando à destruição de *habitats* e ao aumento de erosão, os quais, por outro lado, podem ser igualmente necessários para manutenção e crescimento especializado de algumas espécies.

A forma direta de detecção da ocorrência de eventos de paleo-incêndios vegetacionais em ambientes pretéritos se dá por meio de análises paleobotânicas pela presença de *macro-charcoal* (Figura 4) (*sensu* JONES e CHALONER, 1991; SCOTT, 2000, 2010) em depósitos sedimentares. Os registros mais antigos desse tipo de material foram descritos por Schreiter (1931) para exposições do Ordoviciano/Siluriano da Bacia de Västergötland, na Suécia, e a sua presença está confirmada para praticamente todos os demais intervalos Pré-Quaternários posteriores (EL AFTY et al., *in press*). Portanto, é correto afirmar que o fogo foi um elemento constante nas comunidades vegetais desde o advento das primeiras plantas vasculares (GLASSPOOL et al., 2015).

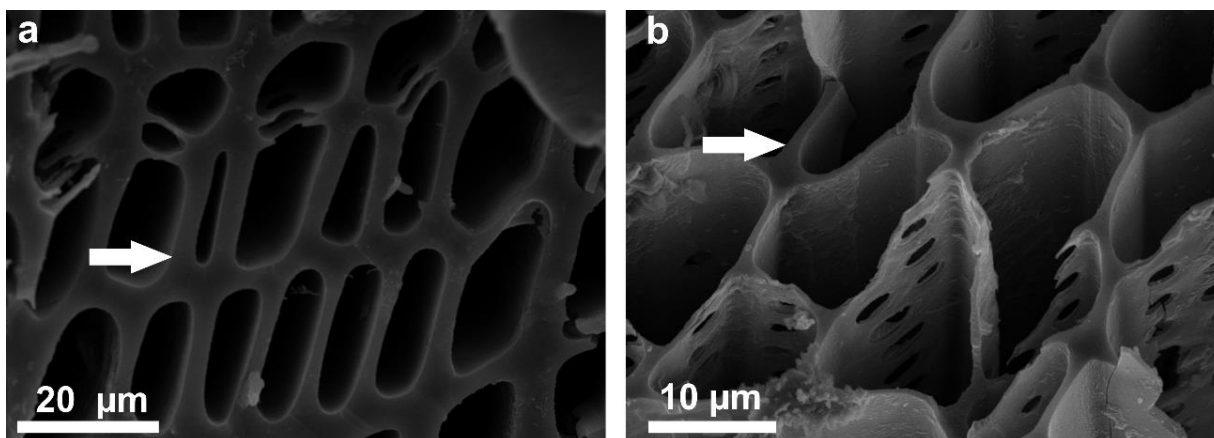
Figura 4. *Macro-charcoal*, visto a olho nu. a) fragmento de *macro-charcoal* proveniente do afloramento Porongos, em Santa Catarina (seta branca), b) *macro-charcoal* visto sob lupa.



Fonte: Do autor.

Em contraste ao carvão mineral, formado pelo processo de carbonificação a partir de matéria orgânica por meio do processo de soterramento e da ação de fatores físicos, como pressão e temperatura (BORBA, 2001), o *macro-charcoal*, caracteriza-se macroscopicamente pela coloração negra, brilho sedoso e pinta ao toque, e, microscopicamente pela presença de paredes celulares homogeneizadas (Figura 5). O *macro-charcoal* é o produto da combustão incompleta dos fragmentos vegetais atribuídos a um processo de carbonização (JONES; CHALONER, 1991; SCOTT, 2010).

Figura 5. *Macro-charcoal* visto sob microscopia eletrônica de varredura (a - b), corte transversal, com detalhes das paredes celulares homogeneizadas (setas brancas).

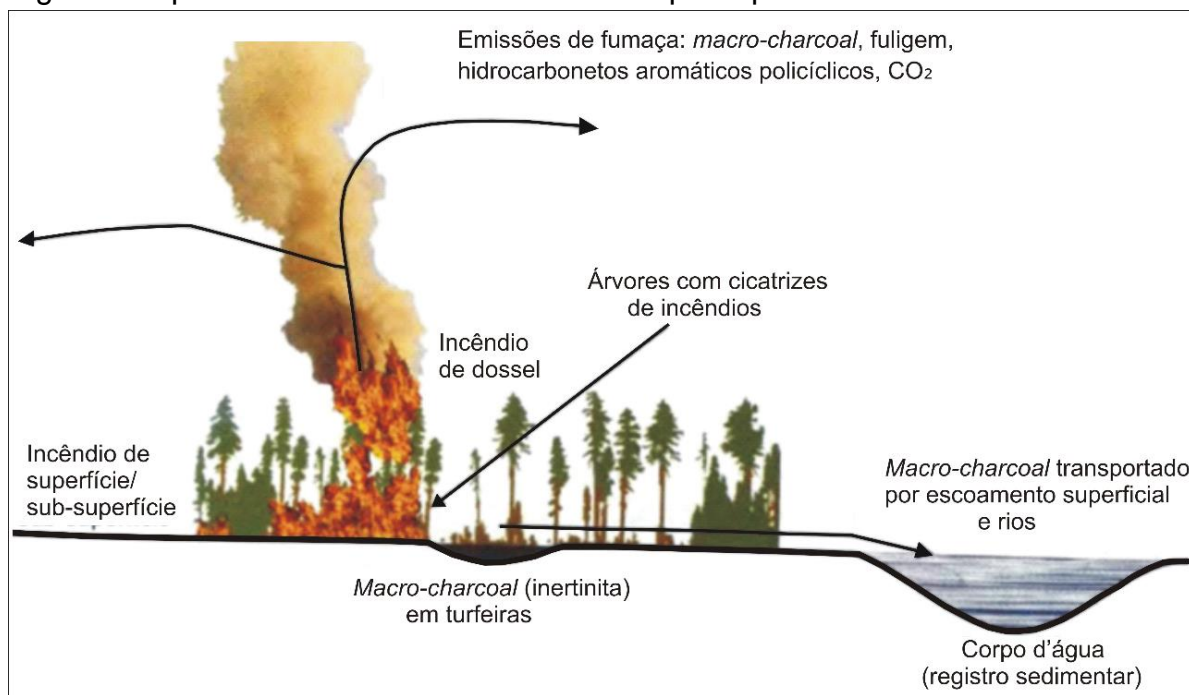


Fonte: Do Autor.

Do ponto de vista paleobotânico, o *macro-charcoal* é uma ferramenta útil para entender a vegetação pretérita (SCOTT, 1974; GLASSPOOL; EDWARDS; AXE, 2004), e, por ser composto por um elevado teor de carbono (60-90%), é relativamente inerte e facilmente preservado no registro fóssil, de forma que tem o potencial para preservar tridimensionalmente as características anatômicas das plantas, permitindo a identificação taxonômica (SCOTT, 2010).

A tafonomia e a preservação do *macro-charcoal* podem ser avaliadas de diferentes formas, sendo importante levar em consideração que os fragmentos podem ser transportados por distâncias consideráveis por meio de correntes de ar ou água e para fora das áreas dos incêndios de origem (e.g. HERRING, 1985; CLARK, 1988; BRADBURY, 1996; SCOTT, 2000; ALI et al., 2009) (Figura 6). Com tais características, este tipo de registro ocorre nos mais diferentes tipos de ambiente. Uma vez depositado, o carvão vegetal pode ser exposto à ação física, podendo auxiliar na avaliação da variada gama de processos tafonômicos ocorridos em associações fossilífera caracterizadas por sua presença (e.g. BIRD et al., 1999; NICHOLS et al., 2000; ASCOUGH et al., 2010; ZIMMERMAN, 2010).

Figura 6. Tipos de incêndios e formas de transporte para o *macro-charcoal*.



Fonte: Modificado de Scott et al., (2014) p. 59, Fig. 2.13.

Desta forma, o estudo do *macro-charcoal* inserido em rochas sedimentares é uma ferramenta essencial para a compressão florística e ambiental da Terra em períodos passados (SCOTT, 2000, 2010). Devido à relevância do estudo dos vegetacionais para a compreensão da história do planeta Terra, durante as últimas décadas, ocorrências de *macro-charcoal* foram amplamente descritas para depósitos sedimentares do Permiano do Hemisfério Norte (SANDER; GEE, 1990; WANG; CHEN, 2001; UHL; KERP, 2003; NOLL; UHL; LAUSBERG, 2003; UHL et al., 2004, 2008, 2012; DIMICHELE et al., 2004; SHEN et al., 2011, 2012; HUDPSITH et al., 2012, 2014).

Em contraste ao Hemisfério Norte, a ocorrência de paleoincêndios vegetacionais no Gondwana era desconsiderada. Este fato está relacionado a abordagens prévias que refutavam a ocorrência de carvão vegetal macroscópico no Gondwana (FALCON, 1989; HUNT, 1989; TAYLOR; LIU; DIESSEL, 1989). Porém, nos últimos anos, diversos estudos descrevem a ocorrência de carvão vegetal

macroscópico para América do Sul (JASPER et al., 2008, 2011a, 2011b, 2011c, 2013; MANFROI et al., 2012, 2015; MENDONÇA FILHO et al., 2013; DEGANI-SCHMIDT et al., 2015; JASPER et al., 2016), África (UHL et al., 2007), Austrália (VAN DE WETERING; MENDONÇA FILHO; ESTERLE, 2013), Antártica (SLATER; MCLOUGHLIN; HILTON, 2015; TEWARI et al., 2015; MANFROI et al., 2015) e Índia (JASPER et al., 2012, 2016, 2017; MAHESH et al., 2015).

Esses estudos sugerem que paleoincêndios vegetacionais eram eventos comuns no Gondwana durante o Permiano, e que a controvérsia em relação à ocorrência deste fenômeno no Gondwana estava relacionada à falta de pesquisa especializada na área, gerando um reduzido número de publicações específicas (ABU HAMAD; JASPER; UHL, 2012). Entretanto, embora diversas evidências destes eventos tenham sido descritas, os padrões que definem a distribuição geográfica dos paleoincêndios vegetacionais ainda não estão claros tanto na esfera regional (Bacia do Paraná) quanto paleocontinental (Gondwana).

Watson, Lovelock e Margulis (1978) afirmam que a ignição do fogo sobre a vegetação está diretamente relacionada aos níveis de oxigênio atmosférico, agindo, segundo Scott (2000), Preston e Schmidt (2006), como um fenômeno comum na modelagem de ambientes atuais e pretéritos. Flannigan et al., (2009), afirmam que não é surpresa que a produção de *macro-charcoal* seja também controlada pelas mudanças climáticas e ambientais, mesmo em longas escalas de tempo.

Confirmando tal teoria, Glasspool e Scott (2010) afirmam que as variações das concentrações de oxigênio na atmosfera têm sido, ao longo do tempo, responsáveis diretamente pela ocorrência dos paleoincêndios. Nesse contexto é necessário que os níveis de O₂ sejam superiores ao limite inferior da “janela de fogo” para que a queima ocorra, necessitando estar acima de 12-15% (UHL; JASPER, 2011). Considerando que os níveis de O₂ atmosférico dependem de um conjunto de variáveis baseadas no equilíbrio ambiental global e regional, o simples registro de paleoincêndios é um indicativo importante de condições paleoambientais.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliar as características anatômicas preservadas em elementos vegetais fósseis permineralizados e carbonizados, a fim de contribuir para a reconstrução do panorama ambiental relacionado as paleofloras de diferentes unidades litoestratigráficas do Gondwana.

3.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar as características do crescimento arbóreo de plantas lenhosas do Permiano da Bacia do Parnaíba, identificando quando possível características em incrementos de crescimento;
- b) relacionar o padrão de crescimento dos lenhos fósseis do Permiano da Bacia do Parnaíba com as variações climáticas, a fim de inferir o paleoclimas vigente na região durante o ciclo de vida destas plantas;
- c) definir os padrões anatômicos gerais (xilotipos) e específicos para os lenhos fósseis da Bacia do Parnaíba e do Paraná, e estabelecer afinidades taxonômicas para este material;
- d) correlacionar os resultados obtidos com padrões paleobiogeográficos já estabelecidos com base em outros dados de natureza geológica/paleontológica;
- e) aprimorar as análises das evidências de *macro-charcoal* referidas até o momento para o Gondwana da Bacia do Paraná;
- f) inferir as condições paleoambientais e os padrões tafonômicos para os sistemas deposicionais estudados;
- i) integrar os dados coletados à rede de informações sobre a ocorrência de paleoincêndios vegetacionais no Gondwana.

REFERÊNCIAS

- ABU HAMAD, A. M. B.; JASPER, A.; UHL, D. The record of Triassic charcoal and other evidence for palaeo-wildfires: signal for atmospheric oxygen levels, taphonomic bias or lack of fuel? **International Journal of Coal Geology**, v. 96–97, p. 60–71, 2012.
- ALI, A. A.; HIGUERA, P. E.; BERERON, Y.; CARCAILLET, C. Comparing fire-history interpretations based on area, number and estimated volume of macroscopic charcoal in lake sediments. *Quaternary Research*, v. 72, p. 462–468, 2009.
- ASCOUGH, P. L. I. Charcoal reflectance measurements: implications for structural characterization and assessment of diagenetic alteration. **Journal of Archaeological Science**, v. 37, n. 7, p. 1590–1599, 2010.
- ASCOUGH, P. L., BIRD, M. I., SCOTT, A. C., COLLINSON, M. E., COHEN-OFRI, I., SNAPE, C. E., & LE MANQUAIS, K. Charcoal reflectance measurements: implications for structural characterization and assessment of diagenetic alteration. **Journal of Archaeological Science**, v. 37, n. 7, p. 1590–1599, 2010.
- BEERLING, D. The emerald planet: how plants changed Earth's history. Oxford: Oxford University Press, 2007.
- BERNER, R. A. COLLINSON, M. E.; SCOTT, A. C. A 450-Million-Year History of Fire. In: BELCHER, C. M. (Ed.). **Fire Phenomena and the Earth System**. Chichester: Wiley-Blackwell, 2013. p. 229–249.
- BIRD, M. I.; MOYO, C.; VEENENDAAL, E. M.; LLOYD, J.; FROST, P. Stability of elemental carbon in a savanna soil. **Global Geochemical Cycles**, v. 13, p. 923–932, 1999.
- BLOIS, J. L., ZARNETSKE, P. L., FITZPATRICK, M. C., FINNEGAN, S. Climate change and the past, present, and future of biotic interactions. **Science**, v. 341, n. 6145, p. 499–504, 2013.
- BOND, W.; KEELEY, J. E. Fire as a global ‘herbivore’: the ecology and evolution of flammable ecosystems. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 20, p. 387–394, 2005.
- BORBA, R. F. Carvão Mineral. In: TUNES, M. R. **Balanço Mineral Brasileiro**. Brasília: DNPM, p. 01–19, 2001.
- BOWMAN, D. M. J. S.; BALCH, J. K.; ARTAXO, P.; BOND, W. J.; CARLSON, J. M.; COCHRANE, M. A.; D’ANTONIO, C. M.; DEFRIES, R. S.; DOYLE, J. C.; HARRISON, S. P.; JOHNSTON, F. H.; KEELEY, J. E.; KRAWCHUK, M. A.; KULL, C. A.; MARSTON, J. B.; MORITZ, M. A.; PRENTICE, I. C.; ROSS, C. I.; SCOTT, A. C.; VAN DER WERF, G. R.; PYNE, S. J. Fire in the Earth System. **Science**, v. 324, p. 481–484, 2009.

- BRADBURY, J. P. Charcoal deposition and redeposition. In Elk Lake, Minnesota, USA. **The Holocene**, v. 6, p. 339–344, 1996.
- BUURMAN, P. Mineralization of fossil wood. **Scripta Geologica**, v.12, p.1–43, 1972.
- CARSON, G. A. Silicification of fossils. **Taphonomy: Releasing the Data Locked in the Fossil Record: Plenum Press, New York**, p. 455–499, 1991.
- CLARK, J. S. Particle motion and the theory of charcoal analysis: source area, transport, deposition and sampling. **Quaternary Research**, v. 30, p. 67–80, 1988.
- CHALONER, W. G.; CREBER, G. T. Do fossil plants give a climatic signal? **Journal of the Geological Society**, v. 147, n. 2, p. 343–350, 1990.
- CREBER, G.T.; CHALONER, W.G. Influence of environmental factors on the wood structure of living and fossil trees. **Botanical Review**, v.4, n. 50, p. 357–448, 1984.
- CREBER, G. T.; FRANCIS, J. E. Fossil tree-ring analysis: palaeodendrology. Fossil plants and spores: modern techniques. **Geological Society, London**, p. 245–250, 1999.
- CRUTZEN, P. J.; GOLDAMMER, J. G. Fire in the environment: the ecological, atmospheric and climatic importance of vegetation fires. **Report of the Dahlem Workshop**, Berlin, 15–20 March, 1992. 1993.
- DEGANI-SCHMIDT, I.; GUERRA-SOMMER, M.; MENDONÇA, J. O.; MENDONÇA FILHO, J. G.; JASPER, A.; CAZZULO-KLEPZIG, M.; IANNUZZI, R. Charcoalified logs as evidence of hypautochthonous/autochthonous wildfire events in a peat-forming environment from the Permian of southern Paraná Basin (Brazil). **International Journal of Coal Geology**, v. 146, p. 55–67, 2015.
- DIAS-BRITO, D.; ROHN, R.; CASTRO, J.C.; DIAS, R.R.; RÖßLER, R. Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional -O mais Exuberante e importante registro Fforístico Tropical-Subtropical Permiano no Hemisfério Sul. In: Winge,M.; 71 Schobbenhaus, C.; Berbert-Born, M.; Queiroz, E.T.; Campos, D.A.; Souza, C.R.G.; Fernandes, A.C.S. (Eds.) **Sítios Geológicos E Paleontológicos Do Brasil**, 2007. Publicado na Internet em 23/01/2007 no Endereço [Http://Www.Unb.Br/Iq/Sigep/Sitio104/Sitio104.Pdf](http://Www.Unb.Br/Iq/Sigep/Sitio104/Sitio104.Pdf).
- DIESSEL, C. F. K. The stratigraphic distribution of inertinite. **International Journal of Coal Geology**, v. 81, p. 251–268, 2010.
- DIMICHELE, W. A.; HOOK, R. W.; NELSON, W. J.; CHANEY, D. S. An unusual Middle Permian flora from the Blaine Formation (Pease River group: Leonardian–Guadalupian series) of King County, West Texas. **Journal of Paleontology**, v. 78, p. 765–782, 2004.
- EL ATFY, H.; HAVLIK, P.; KRÜGER, P. S.; MANFROI, J.; JASPER, A.; UHL, D. in press. Pre-Quaternary wood decay ‘caught in the act’ by fire—examples of

plant-microbe-interactions preserved in charcoal from clastic sediments. **Historical Biology**, 1–10.

FALCON, R. M. S. Macro- and micro-factors affecting coal-seam quality and distribution in southern Africa with particular reference to the No. 2 seam, Witbank coalfield, South Africa. **International Journal of Coal Geology**, v. 12, p. 681–731, 1989.

FALCON-LANG, H. J. A Method to Distinguish Between Woods Produced By Evergreen and Deciduous Coniferopsids On The Basis Of Growth Ring Anatomy: A New Tool. **Palaeontology**, v. 4 n. 43, p. 785–793, 2000.

FALCON-LANG, H. J. Late Carboniferous tropical dryland vegetation in an alluvial-plain setting, Joggins, Nova Scotia, Canada. **Palaos**, v. 18, n. 3, p. 197–211, 2003.

FLANNIGAN, M. D.; KRAWCHUK, M. A.; GROOT, W. J.; WOTTON, B. M.; GOWMAN, L. M. Implications of changing climate for global wildland fire. **International Journal of Wildland Fire**, v. 18, p. 483–507, 2009.

FRANCIS, J.E.; POOLE, I. Cretaceous and early Tertiary climates of Antarctica: evidence from fossil wood. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 182, p. 47–64, 2002.

GASTALDO, R.A.; DIMICHELE, W.A.; PFEFFERKORN, H.W. Out of the Icehouse into the Greenhouse: A late Paleozoic analog for modern global vegetational change. **Geological Society of America**, v. 6, n. 10, 1996.

GERARDS T.; YANS, J.; GERRIENE, P. Quelques implication paléoclimatiques de l'observation de bois fossiles d Waldien du bassin de Mons (Belgique) – **Résultats préliminaires carnets de Géologie: Memoir**, p. 11–10, 2007.

GLASSPOOL, I. J.; EDWARDS, D.; AXE, L. Charcoal in the Silurian as evidence for the earliest wildfire. **Geology**, v. 32, p. 381–383, 2004.

GLASSPOOL, I. J.; SCOTT, A. C. Phanerozoic concentrations of atmospheric oxygen reconstructed from sedimentary charcoal. **Nature Geosciences**, v. 3, p. 627–630, 2010.

GLASSPOOL, I. Palaeoecology of selected South African export coals from the Vryheid Formation, with emphasis on the role of heterosporous lycopods and wildfire derived inertinite. **Fuel**, v. 82, p. 959–970, 2003a.

GLASSPOOL, I.J.; SCOTT, A.C.; WALTHAM, D.; PRONINA, N.V.; SHAO, L. The impact of fire on the Late Paleozoic Earth system. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, n. 1–13, 2015.

GUERRA-SOMMER, M.; SCHERER, C.M.S. Sítios paleobotânicos dos Arenito Mata (Mata e São Pedro do Sul) RS: uma das mais importantes “florestas petrificadas” do planeta. In: Schobbenhaus, C.; Campos, D.A.; Queiroz, E.T.; Winge, M.; Berbert-Born, M.L.C. (eds.) **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. DNPM/CPRM –Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP) –Vol. I, 2002.

- GUO, Y.; BUSTIN, R. M. FTIR spectroscopy and reflectance of modern charcoals and fungal decayed woods: implications for studies of inertinite in coals. **International Journal of Coal Geology**, v. 37, n. 1-2, p. 29–53, 1998.
- HERRING, J. R. Charcoal fluxes into sediments of the North Pacific Ocean: the Cenozoic record of burning. **The carbon cycle and atmospheric CO₂: natural variations Archean to present**, v. 32, p. 419–442, 1985.
- HOWER, J. C.; O'KEEFE, J. M.; WATT, M. A.; PRATT, T. J.; EBLE, C. F.; STUCKER, J. D.; KOSTOVA, I. J. Notes on the origin of inertinite macerals in coals: observations on the importance of fungi in the origin of macrinite. **International Journal of Coal Geology**, 80(2), 135–143, 2009.
- HOWER, J. C.; O'KEEFE, J. M.; EBLE, C. F.; VOLK, T. J.; RICHARDSON, A. R.; SATTERWHITE, A. B.; KOSTOVA, I. J. Notes on the origin of inertinite macerals in coals: Funginite associations with cutinite and suberinite. **International Journal of Coal Geology**, v. 85, n. 1, p. 186–190, 2011.
- HUDSPITH, V.; SCOTT, A. C.; COLLINSON, M. E.; PRONINA, N.; BEELEY, T. Evaluating the extent to which wildfire history can be interpreted from inertinite distribution in coal pillars: an example from the Late Permian, Kuznetsk Basin, Russia. **International Journal of Coal Geology**, v. 89, p. 13–25, 2012.
- HUDSPITH, V. A.; BELCHER, C. M.; YEARSLEY, J. M. Charring temperatures are driven by the fuel types burned in a peatland wildfire. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, p. 714, 2014.
- HUNT, J. W. Permian coals of eastern Australia: geological control of petrographic variation. **International Journal of Coal Geology**, v. 12, p. 589–634, 1989.
- ISELL, J. L.; FRAISER, M. L.; HENRY, L. C. Examining the complexity of environmental change during the late Paleozoic and early Mesozoic. **Palaios**, v. 23, n. 5, p. 267–269, 2008.
- JASPER, A.; AGNIHOTRI, D.; TEWARI, R.; SPIEKERMANN, R.; PIRES, E. F.; DA ROSA, A. S.; UHL, D. Fires in the mire: repeated fire events in Early Permian 'peat forming vegetation of India. **Geological Journal**, v.52, p.955–969, 2017.
- JASPER, A.; GUERRA-SOMMER, M.; HAMAD, A.; ABDALLA, M. B.; BAMFORD, M.; BERNARDES-DE-OLIVEIRA, M.; TEWARI, R.; UHL, D. The burning of Gondwana: Permian fires on the southern continent – A palaeobotanical approach. **Gondwana Research**, v. 24, p. 148–160, 2013.
- JASPER, A.; GUERRA-SOMMER, M.; UHL, D.; BERNARDES-DE-OLIVEIRA, M. E. C.; GHOSH, A. K.; TEWARI, R.; SECCHI, M. I. Palaeobotanical evidence of wildfires in the Upper Permian of India: macroscopic charcoal remains from the Raniganj Formation, Damodar Valley Basin. **The Palaeobotanist**, v. 61, p. 75–82, 2012.

JASPER, A.; MANFROI, J.; SCHMIDT, E. O.; MACHADO, N. T. G.; KONRAD, O.; UHL, D. Evidências paleobotânicas de incêndios vegetacionais no Afloramento Morro Papaléo, Paleozóico Superior do Rio Grande do Sul, Brasil. **Geonomos**, v. 19, p. 18–27, 2011c.

JASPER, A.; UHL, D.; GUERRA-SOMMER, M.; ABU HAMAD, A. M. B.; MACHADO, N. T. G. Palaeowildfires in Gondwana: Remains from a tonstein in the Faxinal coalfield, a Lower Permian coal succession in Southern Paraná Basin, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciência**, v. 83, p. 471–481, 2011b.

JASPER, A.; UHL, D.; GUERRA-SOMMER, M.; BERNARDES-DE-OLIVEIRA, M. E. C.; MACHADO, N. T. G. Upper Paleozoic charcoal remains from South America: Multiple evidence of fire events in the coal-bearing strata of the Paraná Basin, Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 306, p. 205–218, 2011a.

JASPER, A.; UHL, D.; GUERRA-SOMMER, M.; MOSBRUGGER, V. Palaeobotanical evidence of wildfires in the Late Paleozoic of South America - Early Permian, Rio Bonito Formation, Paraná Basin, Rio Grande do Sul State, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 26, p. 435–444, 2008.

JASPER, A.; UHL, D.; TEWARI, R.; GUERRA-SOMMER, M.; SPIEKERMANN, R.; MANFROI, J.; OSTERKAMP, I. C.; BENÍCIO, J. R. W.; BERNARDES-DE-OLIVEIRA, M. E.; ETIENE FABBRIN PIRES, E. F.; DA-ROSA, A. A. Incêndios vegetacionais Indo-Brasileiros no Neopaleozoico: uma revisão dos registros de carvão vegetal macroscópico. **Geologia USP. Série Científica**, v. 16, p. 87–97, 2016.

JONES, T. P.; CHALONER, W. G. Fossil charcoal, its recognition and palaeoatmospheric Significance. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology** (Global and Planetary Change Section), v. 97, n.1–2, p. 39–50, 1991.

KUMAGAI, S.; MATSUNAGA, I. Changes in the distribution of short-term exposure concentration with different averaging times. **American Industrial Hygiene Association**, v. 56, p. 24–31, 1995.

LARSON, P. R. Wood formation and the concept of wood quality. **Bull. Yale Univ. School Forest**. v. 74. 1969.

LEOPOLD, A. **A Sand County almanac and sketches here and there**. New York: Oxford University Press, 1949.

MAHESH, S.; MURTHY, S.; CHAKRABORTY, B.; ROY, M. D. Fossil Charcoal as Palaeofire Indicators: Taphonomy and Morphology of Charcoal Remains in Sub-Surface Gondwana Sediments of South Karanpura Coalfield. **Journal of Geological Society of India**, v. 85, p. 567–675, 2015.

MANFROI, J.; JASPER, A.; GUERRA-SOMMER, M.; UHL, D. Sub-arborescent Lycophytes in Coal-bearing strata from the Artinskian (Early

- Permian/Cisuralian) of the Santa Catarina Coalfield (Paraná Basin, SC, Brazil). **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 15, p. 135–140, 2012.
- MANFROI, J.; UHL, D.; GUERRA-SOMMER, M.; FRANSCISCHINI, H.; MARTINELLI, A.G.; BENTO SOARES, M.; JASPER, A. Extending the database of Permian palaeo-wildfire on Gondwana: Charcoal remains from the Rio do Rasto Formation (Paraná Basin), Middle Permian, Rio Grande do Sul State, Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 436, p. 77–84, 2015.
- MAYER, L.M. Aspectos paleoclimáticos refletidos em espécimes lenhosos gondwânicos do Brasil. **Boletim do Instituto de Geociências da USP, Publicação Especial**, v. 7 p. 89–99, 1989.
- MCPARLAND, L.C.; COLLINSON, M.E.; SCOTT, A.C.; CAMPBELL, G. The use of reflectance for the interpretation of natural and anthropogenic charcoal assemblages. **Archaeological and Anthropological Sciences**, v.1, p. 249–261, 2009.
- MORGA, R.; JELONEK, I.; KRUSZEWSKA, K. Relationship between coking coal quality and its micro-Raman spectral characteristics. **International Journal of Coal Geology**, v. 134, p. 17–23, 2014.
- MUSSA, D. Paleobotânica: conceituação geral e grupos fósseis. In: CARVALHO, I. (Ed.). **Paleontologia. Rio de Janeiro: Interciência**, v. 1, p. 861, 2004.
- NICHOLS, G.J.; CRIPPS, J.A.; COLLINSON, M.E.; SCOTT, A.C. Experiments in waterlogging and sedimentology of charcoal: results and implications. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 164, n. 1–4, p. 43–56, 2000.
- NOLL, R.; UHL, D.; LAUSBERG, S. Brandstrukturen an Kieselhölzern der Donnersberg Formation (Oberes Rotliegendes, Unterperm) des Saar-Nahe Beckens (SW-Deutschland). **Veröffentlichungen Museum für Naturkunde Chemnitz**, v. 26, p. 63–72, 2003.
- PAUSAS, J. G.; KEELEY, J. E. A burning story: The role of fire in the history of life. **Bio Science**, v. 59, n. 7, p. 593–601, 2009.
- PIRES, E. F.; GUERRA-SOMMER, M.; SCHERER, C. M. S. Late Triassic climate in southernmost Parana Basin (Brazil): evidence from dendrochronological data. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 18, n. 2, p. 213–221, 2005.
- PRESTON, Caroline M.; SCHMIDT, M. W. I. Black (pyrogenic) carbon in boreal forests: a synthesis of current knowledge and uncertainties. **Biogeosciences Discussions**, v. 3, n. 1, p. 211–271, 2006.
- PYNE, S. J. **World fire. The culture of fire on earth. Henry Holt and Company**. New York, 1995.

PYNE, S. J. **Fire in America. A cultural history of wildland and rural fire.** Princeton University Press, 1982.

ROHN, R.; RÖßLER, O. Pteridófilas pecopteróides da Formação Rio do Rasto no Estado do Paraná e da Formação Estrada Nova no Estado de São Paulo (Bacia do Paraná, Permiano Superior). **Boletim IG-USP**, São Paulo, v. 17, p. 57–76, 1986.

RÖßLER, R. Two remarkable Permian Petrified Forests: correlation, comparison and significance. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 265, p. 39–63, 2006.

RÖßLER, R.; GALTIER, J. The first evidence of the fern Botryopteris from the Permian of the Southern Hemisphere reflecting growth form diversity. **Review of Paleobotany and Palynology**, Filadelfia, v. 127, p. 99–124, 2003.

SANDER, P. M.; GEE, C. T. Fossil charcoal techniques and applications. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 63, p. 269–279, 1990.
SCHOPF, J.M. Modes of fossil preservation. **Review of Palaeobotany and Palynology**, n. 20, p. 27–53, 1975.

SCHREITER, R. Kambro-silurische “Kohlen” von Västergötland, Schweden. **Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften**, v. 83, p. 635–641, 1931.

SCHWEINGRUBER F.H. Dendroökologische Holzanatomie – Anatomische Grundlagen der Dendrochronologie. Verlag Paul Haupt, Bern, Stuttgart, Wien 2001

SCHWEITZER H.-J. Die Makroflora des niederrheinischen Zechsteins. **Fortschr. Geol. Rhein. Westf.**, v. 6, p. 331–376, 1962.

SCHWEINGRUBER, F.H. Annual growth rings and growth zones in woody plants in southern Australia. **IAWA J**, v. 13, p. 359–379, 1992.

SCHWEINGRUBER, F.H. Tree rings and environment dendroecology. Swiss Federal Institute for Forest. **Snow and Landscape Research**, Stuttgart. 1996.

SCOTT, A. C. Charcoal recognition, taphonomy and uses in palaeoenvironmental analysis. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 291, p. 11–39, 2010.

SCOTT, A. C. Observations on the nature and origin of fusain. **International Journal of Coal Geology**, v. 12, p. 443–475, 1989.

SCOTT, A. C. The pre-Quaternary history of fire. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 164, p. 297–345, 2000.

SCOTT, A., BOWMAN, D.M.J.S., BOND, W.J., PYNE, S.J., ALEXANDER, M.E. **Fire on Earth: An Introduction.** Wiley-Blackwell, Oxford, 434 pp. 2014.

SCOTT, A. C.; GLASSPOOL, I. J. Observations and experiments on the origin and formation of inertinite group macerals. **International Journal of Coal Geology**, v. 70, p. 53–66, 2007.

SCOTT, A.C.; GLASSPOOL, I. J. Observations and experiments on the origin and formation of inertinite group macerals. **International Journal of Coal Geology**, v. 70, n. 1-3, p. 53–66, 2007.

SCOTT, A. The earliest conifer. **Nature**, v. 251, p. 707–708, 1974.

SLATER, Ben J.; MCLOUGHLIN, Stephen; HILTON, Jason. A high-latitude Gondwanan lagerstätte: the Permian permineralised peat biota of the Prince Charles Mountains, Antarctica. **Gondwana Research**, v. 27, n. 4, p. 1446–1473, 2015.

SHEN, J.; ALGEO, T.J.; ZHOU, L.; FENG, Q.; YU, J.; ELLWOOD, B. Volcanic perturbations of the marine environment in South China preceding the latest Permian mass extinction and their biotic effects. **Geobiology**, v. 10, p. 82–103, 2012.

SHEN, W.; SUN, Y.; LIN, Y.; LIU, D.; CHAI, P. Evidence for wildfire in the Meishan section and implications for Permian–Triassic events. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 75, p. 1992–2006, 2011.

TAVARES, TMV; ROHN, R.; CAPRETZ, R. L. Evidências ecomorfológicas em pínulas de Pecopteris permineralizadas da Formação Corumbataí em Piracicaba, SP (Bacia do Paraná, Permiano). In: Anais LVII Congresso Nacional de Botânica. 2006.

TAYLOR, G. H., TEICHMÜLLER, M., DAVIS, A. C. F. K., DIESSEL, C. F. K., LITTKE, R., ROBERT, P. **Organic petrology**. 704, pp. 1998.

TAYLOR, E. L.; TAYLOR, T. N.; KRINGS, M. **Paleobotany: the biology and evolution of fossil plants**. Massachusetts: Academic Press, 2. ed 2009.

TAYLOR, G. H.; LIU, S. Y.; DIESSEL, C. F. K. The cold climate origin of inertinitic Gondwana coals. **International Journal of Coal Geology**, v. 11, p. 1–22, 1989.

TEICHMÜLLER, M. The genesis of coal from the viewpoint of coal petrology. **International Journal of Coal Geology**, 12(1–4), 1–87, 1989.

TEWARI, R., CHATTERJEE, S., AGNIHOTRI, D., PANDITA, S. K. Glossopteris flora in the Permian Weller Formation of Allan Hills, South Victoria Land, Antarctica: implications for paleogeography, paleoclimatology, and biostratigraphic correlation. **Gondwana Research**, v. 28, n. 3, p. 905–932, 2015.

UHL, D.; MOSBRUGGER, V. Leaf venation density as a climate and environmental proxy: a critical review and new data. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 149, n. 1–4, p. 15–26, 1999.

UHL D. Anatomy and taphonomy of a coniferous wood from the Zechstein (Upper Permian) of NW-Hesse (Germany). **Geodiversitas**, v. 26, p. 391–401, 2004.

UHL, D.; ABU HAMAD, A. M. B.; KERP, H.; BANDEL, K. Evidence for palaeo-wildfire in the Late Permian palaeotropics - charcoalified wood from the Um Irna Formation of Jordan. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 144, p. 221–230, 2007.

UHL, D.; BUTZMANN, R.; FISCHER, T. C.; MELLER, B.; KUSTATSCHER, E. Wildfires in the Late Palaeozoic and Mesozoic of the Southern Alps – The Late Permian of the Bletterbach-Butterloch area (Northern Italy). **Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia**, v. 118, p. 223–233, 2012.

UHL, D.; JASPER, A.; ABU HAMAD, A. M. B.; MONTENARI, M. Permian and Triassic wildfires and atmospheric oxygen levels. **WSEAS International Conference on Environmental and Geological Science and Engineering – Special Issues**, v.1, p. 179–188, 2008.

UHL, D.; KERP, H. Wildfires in the late Paleozoic of Central Europe-the Zechstein (Upper Permian) of NW-Hesse (Germany). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 199, p. 1–15, 2003.

UHL, D.; LAUSBERG, S.; NOLL, R.; STAPF, K. R. G. Wildfires in the Late Paleozoic of Central Europe- an overview of the Rotliegend (Upper Carboniferous-Lower Permian) of the Saar–Nahe Basin (SW-Germany). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 207, p. 23–35, 2004.

VAARTAJA, O. Evidence of photoperiodic ecotypes in trees. **Ecological Monographs**, v. 29, n. 2, p. 91–111, 1959.

VAN BELLEN, S.; GARNEAU, M.; ALI, A. A.; BERGERON, Y. Did fires drive Holocene carbon sequestration in boreal ombrotrophic peatlands of eastern Canada? **Quaternary Research**, v. 78, n. 1, p. 50–59, 2012.

VAN DE WETERING, N.; MENDONÇA FILHO, J. G.; ESTERLE, J. Palynofacies changes and their reflection on preservation of peat accumulation stages in the Late Permian coal measures of the Bowen Basin, Australia: A new system for coal palynofacies characterisation. **International Journal of Coal Geology**, v. 120, p. 57–70, 2013.

VERNADSKY, V. **The Biosphere**, Springer Science Business Media, LLC, 1926.

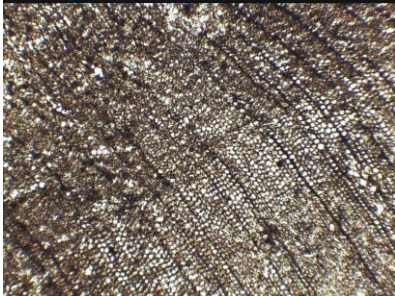
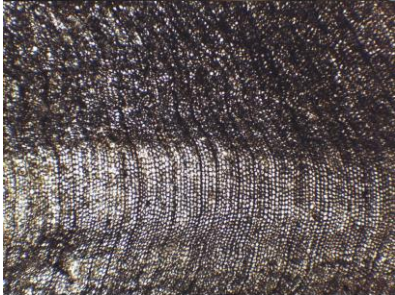
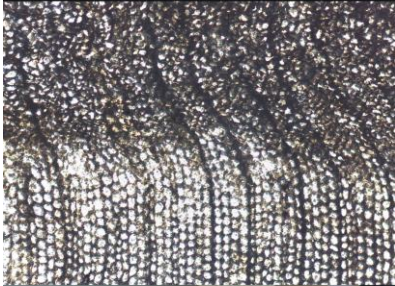
WANG, Z. Q.; CHEN, A. S. Traces of arborescent lycopsids and dieback of the forest vegetation in relation to the terminal Permian mass extinction in North China. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 117, n. 4, p. 217–243, 2001

WATSON, A.; LOVELOCK, J. E.; MARGULIS, L. Methanogenesis, fires and the regulation of atmospheric oxygen. **Biosystems**, v. 10, n. 4, p. 293–298, 1978.

WERNADSKY, V. **The Biosphere**. Berlin-Heidelberg-New York: Springer; dtsh: Der Mensch in der Biosphäre. Zur Naturgeschichte der Vernunft. Hrsg. Hofkirchner, W., Frankfurt: Lang. 1926.

WHITE, M. E. **The flowering of Gondwana: the 400 million year story of Australia's plants**. Princeton University Press, 256 pp., 1990.

ZIMMERMANN, A. R., Abiotic and Microbial Oxidation of Laboratory-Produced Black Carbon (Biochar), *Environmental science & technology*, v. 44, n. 4, p. 1295–1301, 2010



Palaeoclimatic inferences based on dendrological patterns of permineralized wood from the Permian of the Northern Tocantins Petrified Forest, Parnaíba Basin, Brazil

Palaeoclimatic inferences based on dendrological patterns of permineralized wood from the Permian of the Northern Tocantins Petrified Forest, Parnaíba Basin, Brazil

José Rafael Wanderley Benício¹ · Rafael Spiekermann² · Joseline Manfroí¹ · Dieter Uhl^{1,3} · Etienne Fabbrin Pires⁴ · André Jasper¹ 

Received: 7 May 2015 / Revised: 30 July 2015 / Accepted: 11 August 2015 / Published online: 28 October 2015
© Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Abstract The Northern Tocantins Petrified Forest is classified in the scientific literature as one of the most important Permian assemblages of permineralized plant remains from the warm temperate palaeobiome of the Southern Hemisphere. Part of this forest is located in the Tocantins Fossil Trees Natural Monument, which is a Full Protection Conservation Unit in the northeastern part of the Brazilian state of Tocantins. Geologically, the Petrified Forest is part of the Parnaíba Basin, and the studied stems originate from the Permian Motuca Formation. The aim of the present work is to reconstruct aspects of the regional climate during the Permian by using proxy data obtained from the analysis of gymnospermous fossil stems preserved in the Northern Tocantins Petrified Forest. The material analysed comes from 32 gymnospermous fossil wood fragments derived from nine

sampling points located inside and outside the park area. In order to determine climatic influence on wood growth, a total number of 682 growth increments were investigated using mean sensibility and annual sensibility analysis. Moreover, thin sections were made and the anatomical details of the growth patterns of the stems were investigated. The results obtained from these analyses allowed the establishment of the presence of growth zones in the gymnospermous fossil stems. Detailed analysis of these growth zones led to the reconstruction of a seasonal climate with periods of high precipitation alternating with periods of more or less severe dryness, probably in a semi-arid palaeoenvironment. This result is in agreement with previous reconstructions for the Northern Tocantins Petrified Forest area, which postulated a kind of monsoonal climate, characterised by marked seasonality, with strong rains and distinct dry periods.

Electronic supplementary material The online version of this article (doi:10.1007/s12549-015-0218-8) contains supplementary material, which is available to authorized users.

✉ André Jasper
ajasper@univates.br

¹ Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento, PPGAD, Centro Universitário Univates, Avenida Avelino Tallini, n° 171, Bairro Universitário, CEP 95900-000 Lajeado, Rio Grande do Sul, Brazil

² Setor de Botânica e Paleobotânica, Museu de Ciências Naturais, Centro Universitário Univates, Avenida Avelino Tallini, n° 171, Bairro Universitário, CEP 95900-000 Lajeado, Rio Grande do Sul, Brazil

³ Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum, Senckenberganlage 25, 60325 Frankfurt am Main, Germany

⁴ Laboratório de Paleobiologia, Universidade Federal do Tocantins, Rua 07, quadra 15, s/n°, Jardim dos Ipês, CEP 77500-000 Porto Nacional, Tocantins, Brazil

Keywords Permian · Parnaíba Basin · Tocantins · Growth zones · Dendrology · Palaeoclimate · Gondwana · Semi-arid

Introduction

The Northern Tocantins Petrified Forest is classified in the scientific literature as one of the most beautiful and important Permian assemblages of permineralized plant remains from the warm temperate palaeobiome of the entire Southern Hemisphere (Dernbach 1996; Rößler 2006; Dias-Brito et al. 2009). Considering the significance of this Petrified Forest from a scientific point of view as well as a world-class palaeontological heritage, in 2000 the Tocantins State Government implemented a Full Protection Conservation Unit called “Tocantins Fossil Trees Natural Monument”, with the aim of protecting this singular palaeobotanical assemblage for science and society (Dias-Brito and Castro 2005).

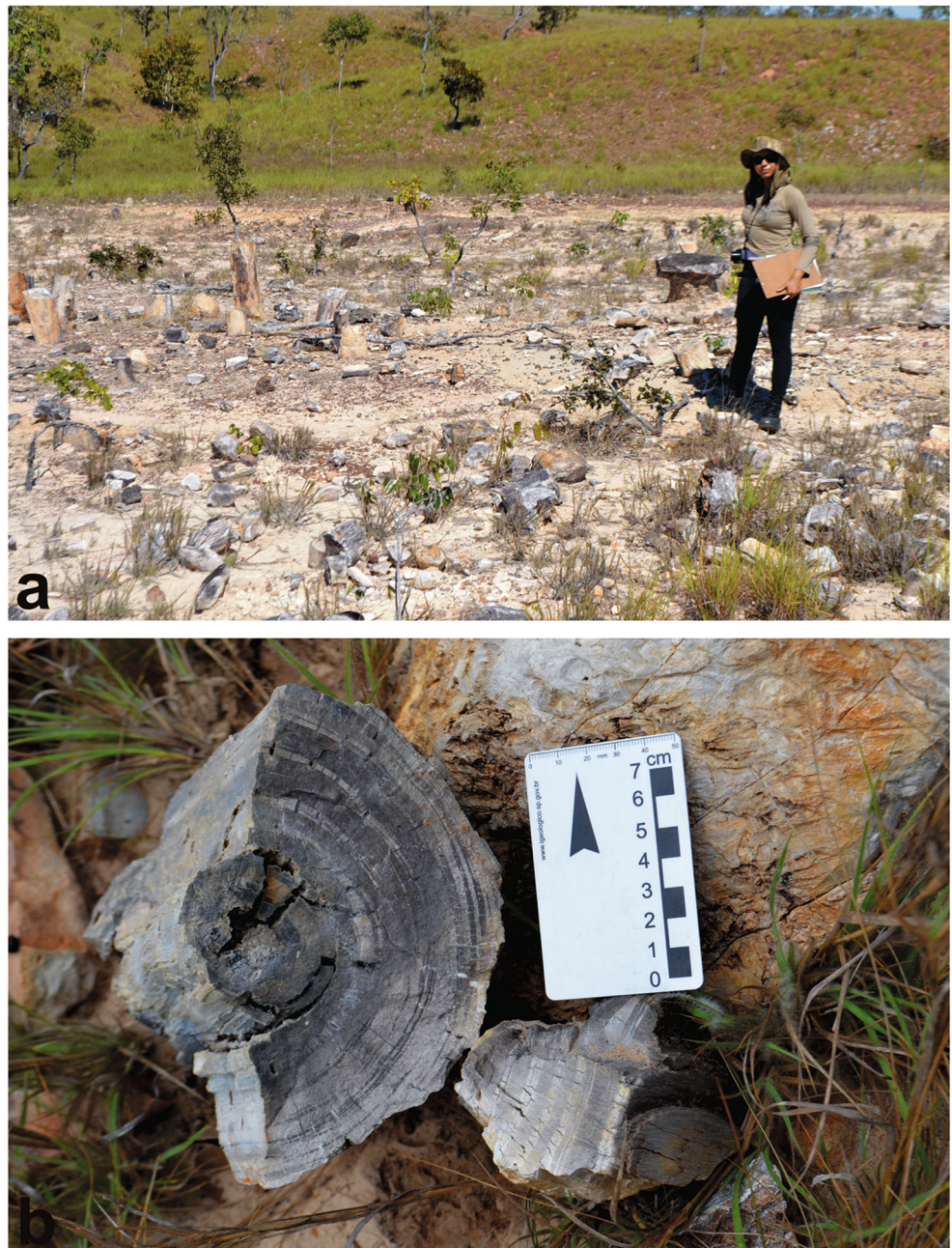
The palaeobotanical assemblage preserved in this area is composed of three-dimensionally permineralized remains of tree ferns (e.g. Herbst 1985, 1992, 1999; Rößler and Galtier 2002a, b, 2003; Tavares et al. 2014), sphenophytes (e.g. Coimbra and Mussa 1984; Neregato et al. 2015) and gymnosperms (e.g. Coimbra and Mussa 1984; Mussa and Coimbra 1987; Pires et al. 2011; Kurzawe et al. 2013a, b). The majority of the fossils are dispersed loosely on the ground (Fig. 1.) and only a few specimens have been found within the original sediments (Capretz and Rohn 2013). The fossil-bearing strata consist of fluvial beds at the basal level of the Motuca Formation

(Pinto and Sad 1986; Dias-Brito et al. 2007; Faria et al. 2009; Capretz and Rohn 2013).

Although several palaeobotanical studies have been carried out on material from the Northern Tocantins Petrified forest (e.g. Coimbra and Mussa 1984; Mussa and Coimbra 1987; Rößler and Galtier 2002a, b, 2003; Tavares et al. 2014; Neregato et al. 2015), palaeoclimatic studies based on growth patterns of fossil gymnosperm wood are still scarce, and so far only a single detailed study has been published on this topic, by Pires et al. (2011).

Studies on growth patterns of fossil wood may provide, under certain conditions, the recognition of regional

Fig. 1 Field impressions from the Northern Tocantins Petrified Forest: **a** overview of the Tocantins Fossil Natural Monument showing the fossils loosely on the ground, **b** sample UFT 668 before collection. The gymnosperm stem was lying loosely on the ground, characteristic for the majority of the fossils from the Northern Tocantins Petrified Forest



climate conditions that can be used to reconstruct palaeo-environment conditions during the lifetime of a plant (e.g. Creber and Chaloner 1984; Creber and Francis 1999; Parrish 1999; Falcon-Lang 2005).

The aim of the present study is to use such growth patterns in fossil gymnospermous wood from the Northern Tocantins Petrified Forest to reconstruct climatic conditions during the deposition of the Permian Motuca Formation in the Parnaíba Basin in Brazil.

Geological setting

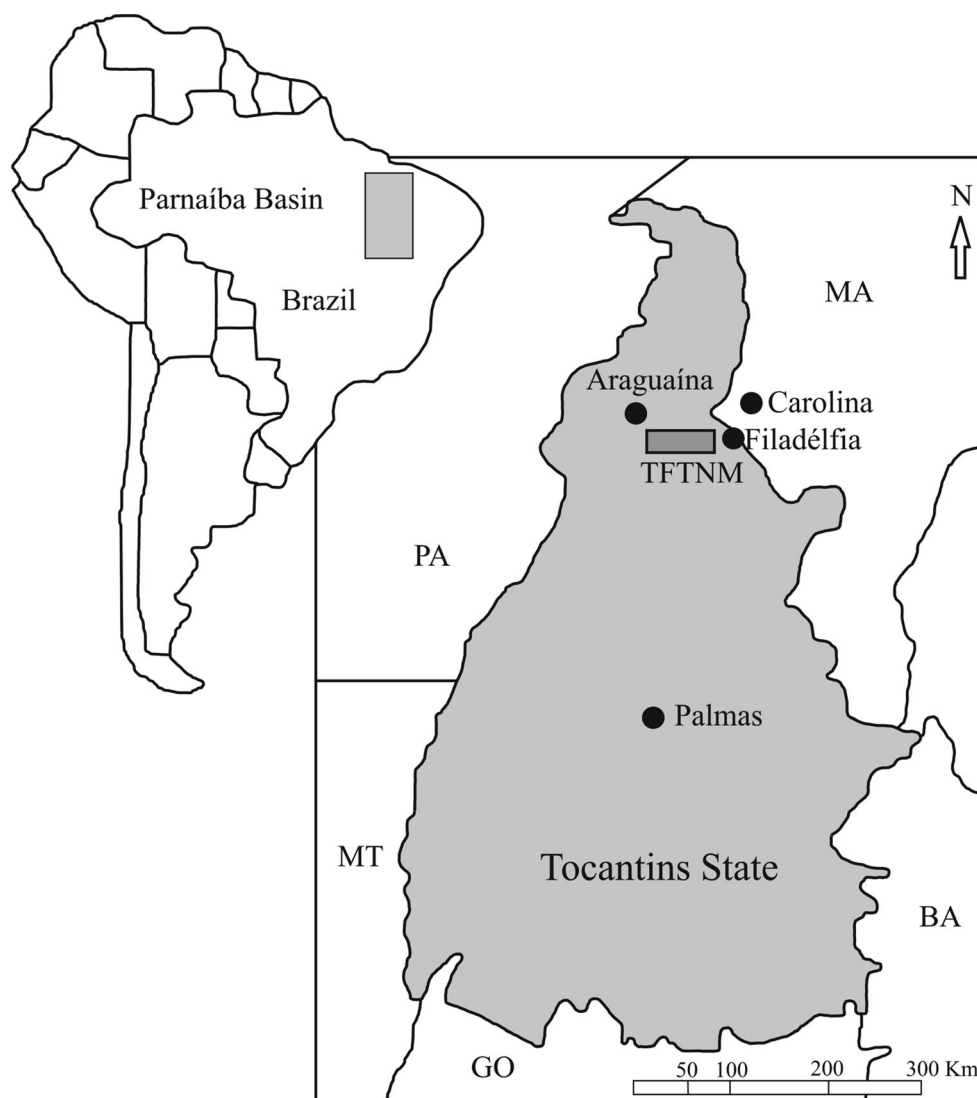
Geologically, the Natural Monument of the Tocantins Fossil Trees is part of the Parnaíba Basin, geographically located in the northeast of Tocantins State, near the border to Maranhão State (Fig. 2) (Dias-Brito and Castro 2005). Developed over a continental basement during the plateau

stage of the South American Platform, the Parnaíba Basin stretches across 6,000,000 km² and contains sediments from the Silurian up to the Cretaceous (Petri and Fulfaro 1983; Almeida and Carneiro 2004).

The lithological units exposed in the Natural Monument of the Tocantins Fossil Trees are the Pedra de Fogo, the Motuca and the Sambaíba formations (Fig. 3). These formations form the Permo-Triassic Balsas Group (Dias-Brito and Castro 2005; Dias-Brito et al. 2009).

Based on the fact that the majority of the fossils are lying loosely on the surface (Capretz and Rohn 2013), there are some controversies about the exact stratigraphic position of the horizon from which the stems originate (e.g. Rößler 2006). Traditionally, the permineralized stems have been ascribed to the Pedra de Fogo Formation (Coimbra and Mussa 1984; Mussa and Coimbra 1987; Herbst 1992, 1999; Góes and Feijó 1994; Dino et al. 2002). However, in the area of the Natural Monument of Tocantins Fossil Trees and surrounding

Fig. 2 Map of Tocantins, showing the location of the Tocantins Fossil Trees Natural Monument area (TFTNM, rectangle in northeastern of Tocantins). MA Maranhão, PA Pará, MT Mato Grosso, GO Goiás, BA Bahia (adapted from Tavares et al. 2014)



	Formation	Group	Palaeoenvironment
Triassic	Sambaíba	Balsas	Desertic
Permian	Motuca		Desertic/Lacustrine
	Pedra de Fogo		Coastal Shallow Platform

Fig. 3 Lithological units exposed in the Tocantins Fossil Trees Natural Monument (adapted from Góes and Feijó 1994)

areas, the fossils may be found embedded in sandstones of the basal level of the Motuca Formation (Faria et al. 2009; Pinto and Sad 1986; Dias-Brito and Castro 2005; Dias-Brito et al. 2007; Capretz and Rohn 2013).

The base of the Motuca Formation, which reaches a total thickness of 300 m, consists of sandstones, passing upwards into red pelites, limestone lenses and anhydrite, covered again by sandstone (Petri and Fulfaro 1983; Góes and Feijó 1994). Based on this lithology, the Motuca Formation is usually interpreted to have been deposited in a relatively dry palaeoenvironment with *sabkha* plains (Góes and Feijó 1994; Lima Filho 1999; Capretz and Rohn 2013).

With regard to the age, the Motuca Formation has usually been interpreted to be of Early to Middle Permian age (Petri and Fulfaro 1983; Dias-Brito et al. 2007; Röbller and Galtier 2002a). In contrast, some studies consider a Late Permian age (Mesner and Wooldridge 1964; Góes and Feijó 1994; Faria and Truckenbrodt 1980; Vaz et al. 2007). These controversies are mostly due to the lack of fossiliferous sedimentary layers and to the absence of biostratigraphically meaningful marker fossils (Dias-Brito et al. 2007). Thus, at the moment, there is no unequivocal age assessment for the Motuca Formation beyond an assignment to the Permian, and further geological studies are needed to clarify its stratigraphic position.

Material and methods

For the present study, 317 fossil gymnosperm stems, deriving from nine sampling points located inside and outside the Tocantins Fossil Trees Natural Monument area (Fig. 4), were collected by the Palaeobiology Laboratory of the Federal University of Tocantins staff during a field expedition in August 2013.

Although lying loosely on the ground, the collected fossil stems are all ascribed to the sandstones of the basal level of the Motuca Formation (Faria et al. 2009; Pinto and Sad 1986; Dias-Brito et al. 2007; Capretz and Rohn 2013). The fossils are deposited in the Palaeobiology Laboratory of the Federal

University of Tocantins, Porto Nacional city, Tocantins state under the acronym UFT.

Due to the good anatomical preservation of their wood, exhibiting growth increments, 32 fossil stems (deriving from 7 localities; cf. Table 1) were selected for a detailed dendrological analysis. These fossils are permineralized by silicates, and only the secondary xylem is preserved (Fig. 5). So far, these woods have not been studied taxonomically, but it is considered that they represent a kind of random sample (although it should be clear that preservation could be taxon-specific), which is more or less representative of the gymnospermous component of this flora.

All the growth increments widths were measured, from a peripheral portion to the inner portion, directly on the radial section of each specimen using an analogue caliper (Starrett 799). Statistical data for each fossil stem were obtained following Fritts (1976) (based on Douglass 1928), using mean sensitivity (MS) and annual sensitivity (AS). According to Fritts (1976), MS is a measure of the variability of wood growth in a year. Mathematically, it represents the mean variability of the ring widths over a series of rings:

$$\text{Mean sensitivity} = \frac{I}{n-I} \sum_{t=1}^{t=n-1} \left| \frac{2(x_{t+1} - x_t)}{x_{t+1} + x_t} \right|$$

With x = ring width, t = year of the ring and n = number of rings in the sequence. The theoretical values range from 0 (no variability) to a maximum of 2 (high variability). An arbitrary value of 0.3 was taken to separate “complacent” trees that grow under a favorable and uniform climate ($MS < 0.3$) from those which are “sensitive” to fluctuating climatic parameters ($MS > 0.3$).

The AS, which represents the climatic variability along the sequence of growth rings, was calculated for each specimen and represented in histograms using Microsoft Excel [Electronic Supplementary Material (ESM) 1].

Moreover, thin sections were made at the Thin Sectioning Laboratory of Federal University of Rio de Janeiro, and the anatomical details of the growth patterns (size of the tracheid lumina and cell wall thickness) of the stems were observed qualitatively with an optical microscope (Carl Zeiss Model MC-80).

Although not frequently used, this methodology (based on Douglass 1928) has already provided important contributions to the understanding of palaeoclimates (e.g. Creber and Chaloner 1984; Francis 1984; Brea 1998; Francis and Poole 2002; Pires et al. 2005). Although MS and AS have originally been introduced for the study of true growth rings (cf. Douglass 1928; Creber and Francis 1999), it has previously been used for the analysis of modern wood from semiarid climates (e.g. Nicolini et al. 2010), which exhibits only growths zones lacking a clear transition from late wood to early wood (Schweingruber 1996). Therefore, these

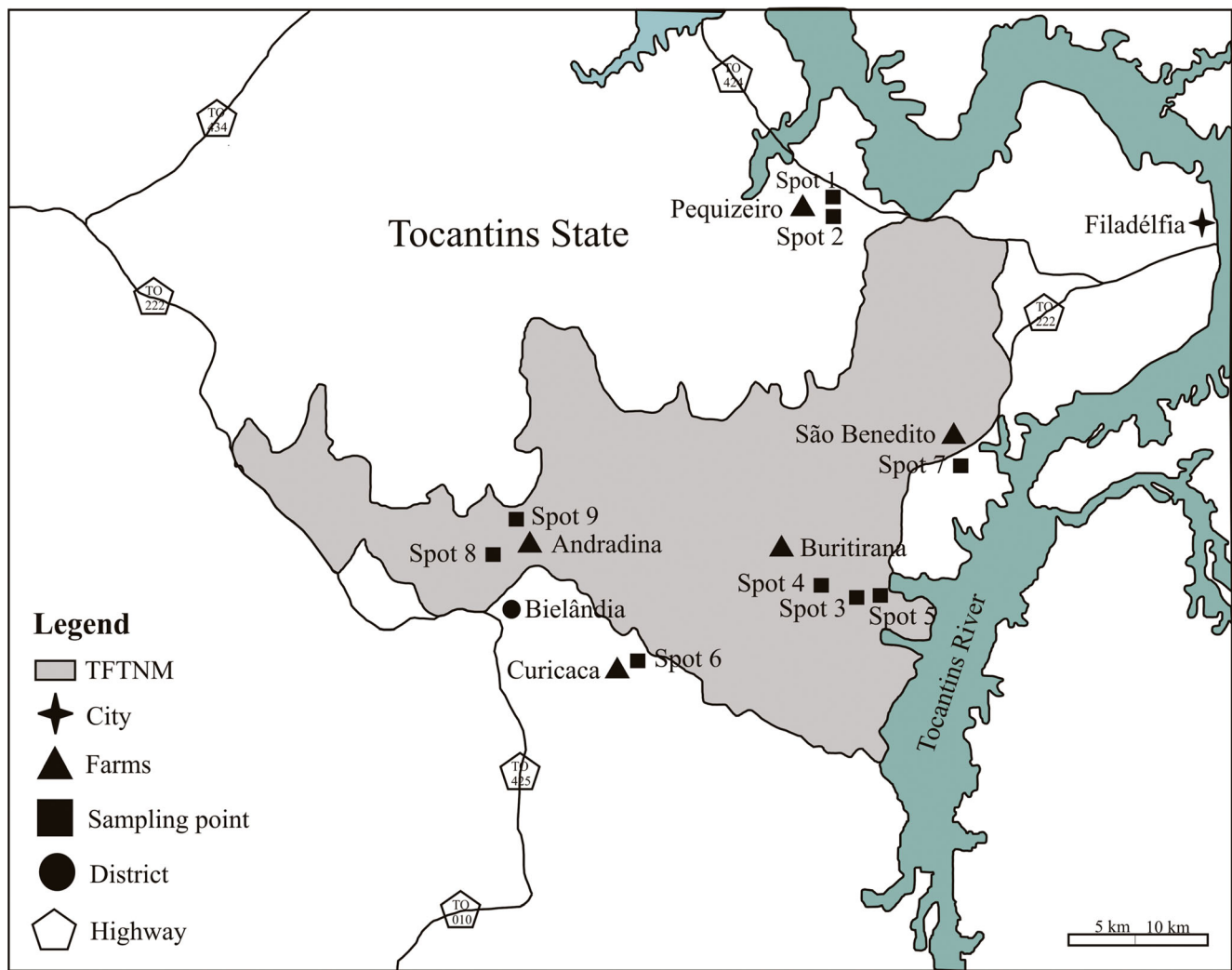


Fig. 4 The Tocantins Fossil Natural Monument (*TFTNM*) showing position of the individual sampling points

techniques have been used in the present study to test whether they can be used for the analysis of fossil wood exhibiting growth zones and not true growth rings (see below).

Results

By microscopic analysis of the thin sections, it was possible to observe that there is a decrease in the size of the tracheid lumina (range from 16 to 28 μm) in late wood without an increase of the cell wall thickness. However, differing from true growth rings, the reduction of the lumina does not cease abruptly, and, thus, there is no sudden transition from late wood to early wood. As there is no sharp delimitation between late wood and early wood due to a total cessation of cambial activity, there is no formation of true growth rings but so-called growth zones were formed, which nevertheless reflect significant changes in cambial activity (see below) (Fig. 6).

Measurements were obtained from a total of 682 growth zones observed in the 32 specimens. Growth zone boundaries

were defined by a decrease of the diameter of the cell lumina at the contact between late wood and early wood (cf. Fig. 6).

The minimum number of growth zones observed for the specimens was 11 and the maximum was 37 (Table 1). The minimum width of the growth zones ranged from 0.4 to 1.45 mm and the maximum width ranged 3.05 to 18.80 mm. The average of minimum and maximum growth zones width ranged from 0.558 to 0.778 (Fig. 6; Table 1). MS ranged from 0.367 to 1.475 (average 0.778). The minimum value of the annual sensibility was 0.004 and the maximum was 1.749 (Table 1). According to Fritts (1976), all specimens investigated show a numerical value of MS considered as sensitive.

Discussion

Quantitative and qualitative analysis of wood growth provides high-resolution information about ancient environments, and this aids in understanding past climates (e.g. Falcon-Lang 2005; Gerards et al. 2007). Wood growth is influenced by a

Table 1 Results of the analysis of the growth zones

	Samples	Locality	Number of growth zones	Average of ring widths [mm]	Mean sensitivity	Minimum annual sensitivity	Maximum annual sensitivity
1	UFT 946	Spot 1	26	4.147	0.704	0.050	1.734
2	UFT 947	Spot 1	17	0.558	1.475	0.017	1.496
3	UFT 954	Spot 1	31	2.525	0.661	0.081	1.329
4	UFT 955-1	Spot 1	16	4.430	0.870	0.163	1.749
4	UFT 979-1	Spot 1	19	3.306	0.781	0.004	1.484
4	UFT 981-1	Spot 1	24	2.390	0.596	0.060	1.582
7	UFT 984-4	Spot 1	17	2.876	0.719	0.133	1.282
8	UFT 985	Spot 1	21	3.937	0.651	0.077	1.472
9	UFT 996	Spot 2	19	3.816	0.595	0.133	1.554
10	UFT 1001	Spot 2	26	3.593	0.860	0.045	1.625
11	UFT 1013	Spot 2	12	2.314	0.367	0.016	1.366
12	UFT 851-9	Spot 3	17	2.554	0.705	0.184	1.464
13	UFT 854-10	Spot 3	26	4.058	0.554	0.028	1.117
14	UFT 855-3	Spot 3	20	3.686	1.136	0.035	1.642
15	UFT 860	Spot 3	29	3.008	1.243	0.072	1.617
16	UFT 861	Spot 3	14	8.436	1.013	1.094	1.537
17	UFT 867	Spot 3	21	3.540	0.637	0.141	1.363
18	UFT 880	Spot 3	25	4.945	0.838	0.156	1.462
19	UFT 870-3	Spot 3	37	2.755	0.722	0.075	1.518
20	UFT 848	Spot 3	25	4.656	0.665	0.284	1.413
21	UFT 882	Spot 3	18	4.057	0.646	0.131	1.562
22	UFT 883	Spot 3	15	4.885	1.040	0.352	1.419
23	UFT 978-1	Spot 6	18	0.645	0.645	0.147	1.577
24	UFT 1040	Spot 6	27	3.433	0.614	0.158	1.116
25	UFT 1041	Spot 6	11	6.178	0.713	0.061	1.430
26	UFT 668	Spot 7	21	2.829	0.638	0.033	1.690
27	UFT 976	Spot 8	22	4.618	1.073	0.055	1.683
28	UFT 974-1	Spot 8	15	2.558	0.798	0.063	1.342
29	UFT 975	Spot 8	23	0.661	0.671	0.090	1.405
30	UFT 928-1	Spot 9	24	2.673	0.863	0.050	1.378
31	UFT 941	Spot 9	21	4.140	0.943	0.282	1.562
32	UFT 925	Spot 9	25	3.505	0.478	0.042	1.275
	Total/Average		682	3.49	0.778	0.134	1.529

Minimum and maximum values are in bold

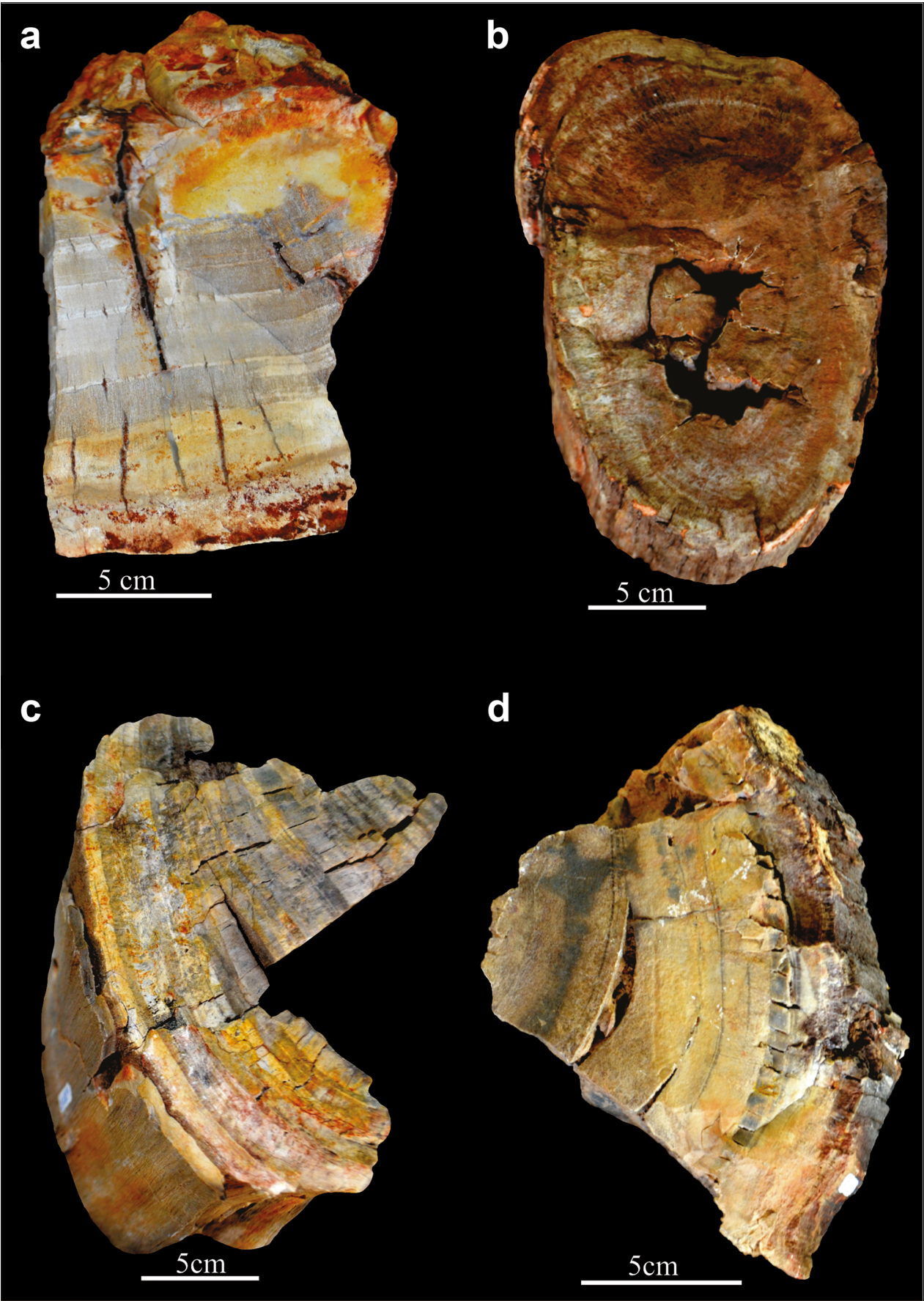
range of abiotic and biotic factors, amongst which climate has a key role (e.g. Schweingruber 1996; Falcon-Lang 2000; Brison et al. 2001). Although some taxa present uniform woody growth even under fluctuating climates, the majority of trees present a growth pattern controlled by the climatic seasonality (Schweingruber 1996, 2007). This climatic seasonality may generate growth rings, which can occur in different climates (Creber and Chaloner 1984; Schweingruber 1992, 1996).

However, under certain climatic conditions, the formation of growth zones occurs, which differ from true growth rings by the fact that they lack a clear transition from late wood to early wood (Schweingruber 1996). Through microscopic analysis of the fossil woods from Tocantins, it was possible to observe

such a growth pattern, as there is an absence of a clear transition between late wood and early wood in all specimens investigated. According to Schweingruber (1996), such a growth pattern is typically characteristic of trees growing in arid regions.

For the Petrified Forest of Tocantins, fossil gymnosperm wood with “weak growth rings” has been previously described (Coimbra and Mussa 1984; Mussa and Coimbra 1987). This growth pattern was subsequently characterised as growth zones by Pires et al. (2011). Recently, Neregato et al. (2015) mentioned

Fig. 5 Permineralized gymnosperms from Northern Tocantins Petrified Forest presenting well preserved growth increments: **a** UFT 1001; **b** UFT 978; **c** UFT 978; **d** UFT 941



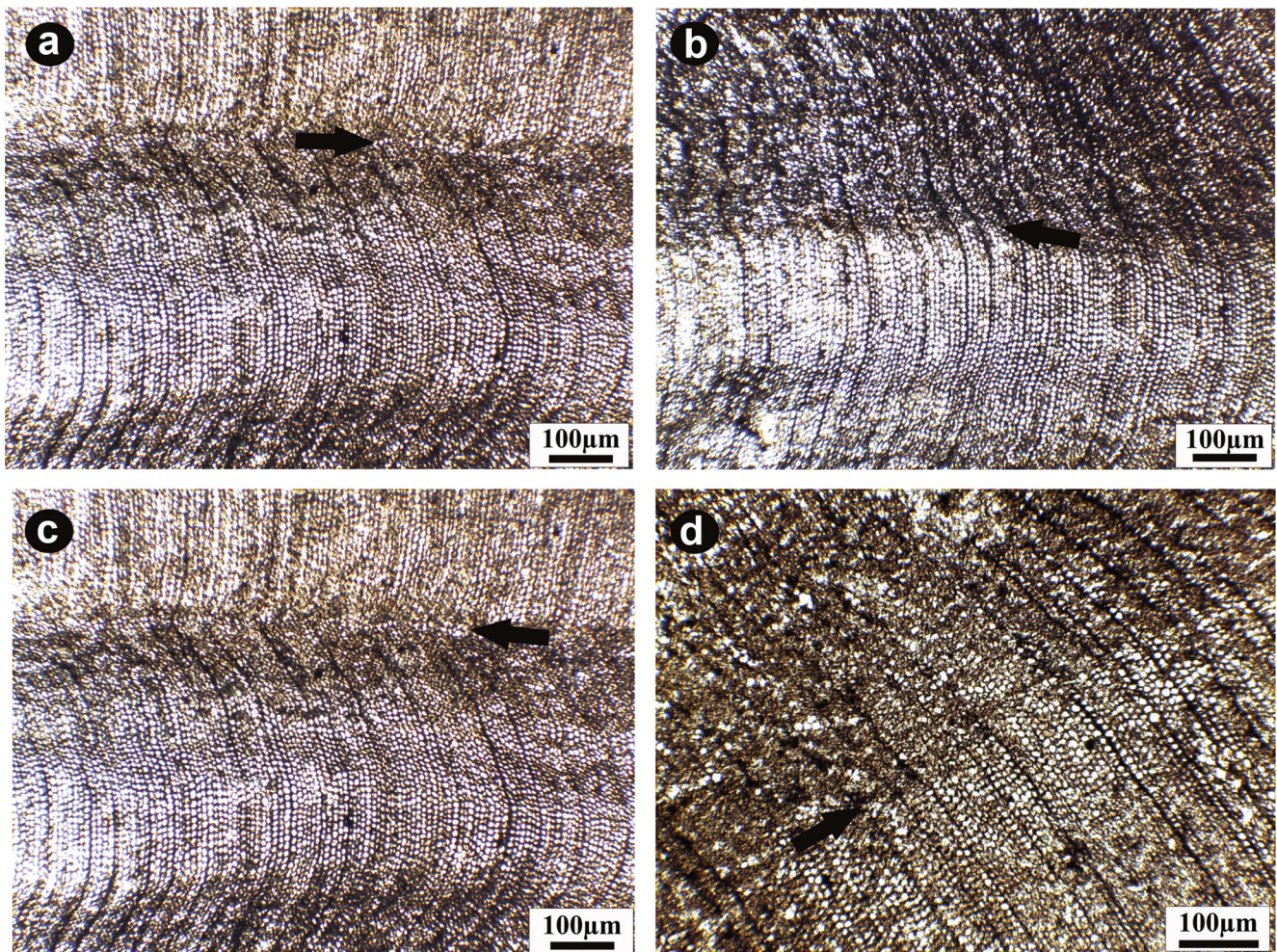


Fig. 6 Microscopic images of growth zones; **a** UFT 976; **b** UFT 947; **c** UFT 1001: arrows point to boundaries of growth zones; **d** UFT 1001: no abrupt transition from late wood and early wood visible (arrow)

the occurrence of growth rings in sphenophyte wood from the Permian of Tocantins. All these authors associated such growth patterns with the occurrence of hydric stress that commonly occurs in arid and semi-arid regions of the tropical-subtropical belt. This interpretation is strengthened by lithological interpretations of a semi-arid to arid climate during deposition of the Motuca Formation (Lima and Leite 1978; Pinto and Sad 1986; Góes and Feijó 1994; Dias-Brito et al. 2007; Matysová et al. 2010).

Based on our results and existing palaeoclimatic interpretations, it is thus possible to support previous reconstructions of an arid to semiarid climate for the Tocantins Petrified Forest. Furthermore, the data from MS analyses indicate oscillating environmental conditions, since all the specimens are sensitive with respect to this parameter. The average value for the mean sensitivity was 0.778, pointing to the occurrence of extreme climatic events according to Schweingruber (2007). Such a seasonality may be related to monsoonal climates with seasonally occurring torrential rains and droughts (Lodge et al. 1994; Borchert 1999), as previously suggested for the western part of Pangea (e.g. Rees et al. 1999; Gibbs et al.

2002; Tabor and Montañez 2002; DiMichele et al. 2006; Schneider et al. 2006). These results also indicate that AS and MS can in fact be used for the analysis of fossil wood exhibiting only growth zones and no true growth rings. On a landscape scale, no pattern of AS and MS values is visible, which could reflect regional differences in environmental conditions (cf. Table 1). Considering the variation of both parameters in the entire sample studied here (32 specimens from 7 localities), it has to be emphasised that comparable studies which are only based on single or a few specimens should be interpreted with great care.

All in all, our data support reconstructions of a semi-arid climate with monsoonal torrential rainfall for the Northern Tocantins Petrified Forest. In addition, this interpretation is reinforced by the fact that the plants from Tocantins are permineralized, as the permineralization process of the fossil stems most likely involved periods with high evaporation (Tavares and Rohn 2009; Matysová et al. 2010; Tavares 2012). It is also congruent with the observation of xeromorphic features in remains of Marattiales (Tavares et al. 2014).

Conclusions

Based on our new and existing data, we can draw the following conclusions concerning permineralized wood from Tocantins and its palaeoclimatic implications:

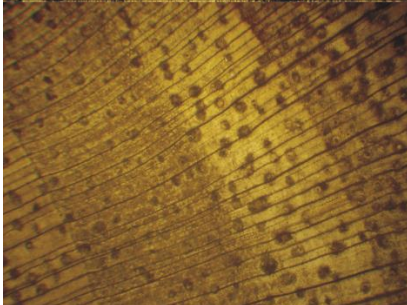
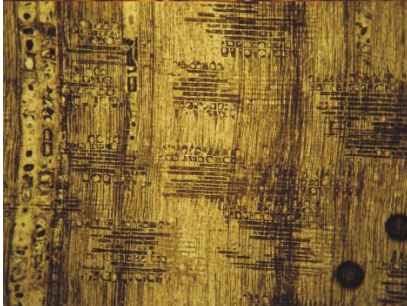
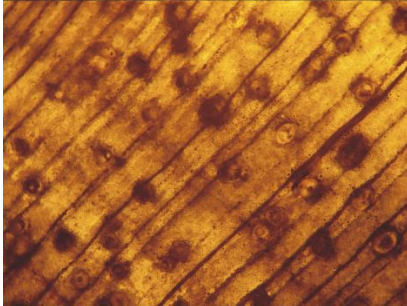
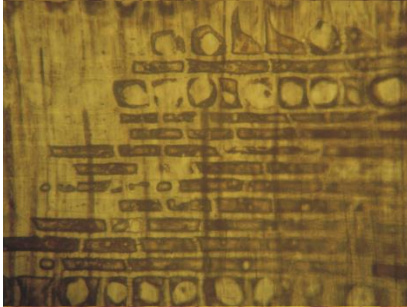
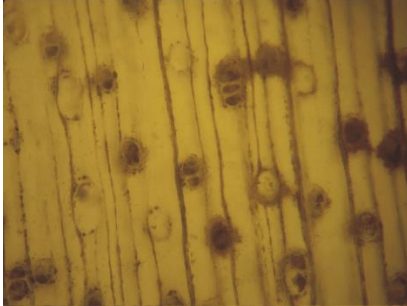
1. The wood from Northern Tocantins Petrified Forest, Parnaíba Basin, Brazil, exhibits growth zones and not growth rings *sensu stricto*;
2. AS and MS can be used for the analysis of fossil woods with growth zones and no true growth rings;
3. the growth zones were probably caused by seasonal climatic conditions, i.e. periods of high precipitation alternating with periods of drought, in a semi-arid palaeoenvironment;
4. previous interpretations of a monsoonal climate during deposition of the sediments of the Motuca Formation can be supported.

Acknowledgements All the authors acknowledge the financial support by CAPES (A072/2013), CAPES/PROSUP and CNPq (400972/2013-1, 444330/2014-3), Brazil. J.R.W.B acknowledges FAPERGS, Brazil, for a master scholarship (014/2012 – BMT), E.F.P. acknowledges CNPq (401845/2010-9), A. Jasper acknowledges CNPq (301585/2012-1), CAPES (Brazil – 8107-14-9) and Alexander von Humboldt Foundation (Germany BRA 1137359 STPCAPES). Furthermore, we thank two anonymous reviewers for their constructive comments that helped to improve the manuscript.

References

- Almeida, F. F. M., & Carneiro, C. D. R. (2004). Inundações Marinhas Fanerozóicas no Brasil Recursos Minerais Associados. In V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C. D. R. Carneiro, & B. B. Brito-Neves (Eds.), *Geologia do Continente Sul-Americano, Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida* (pp. 43–58). Beca: São Paulo.
- Borchert, R. (1999). Climatic periodicity, phenology, and cambium activity in tropical dry forest trees. *IAWA Journal*, 20(3), 239–247.
- Brea, M. (1998). Análisis de los anillos de crecimiento en leños fósiles de coníferas de la Formación La Meseta, Isla Seymour (Marambio) Antártida. *Paleógeno de América de Sur y de la Península Antártida*, 5, 163–176.
- Brison, A. L., Philippe, M., & Thévenard, F. (2001). Are Mesozoic wood growth rings climate induced? *Paleobiology*, 27(3), 531–538.
- Capretz, R. L., & Rohn, R. (2013). Lower Permian stems as fluvial paleocurrent indicators of the Parnaíba Basin, northern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 45, 69–82.
- Coimbra, A. M., & Mussa, D. (1984). Método de estudo tafonômico aplicado a lignispécimes permianos da bacia do Paraná. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 56(1), 85–101.
- Creber, G. T., & Chaloner, W. G. (1984). Influence of environmental factors on the wood structure of living and fossil trees. *Botanical Review*, 50(4), 357–448.
- Creber, G. T., & Francis, J. E. (1999). Tree ring analysis: palaeodendrochronology. In T. Jones & N. Rowe (Eds.), *Fossil Plants and Spores: Modern Techniques* (pp. 245–250). London: Geological Society.
- Dernbach, U. (1996). *Petrified Forests: The World's 31 Most Beautiful Petrified forests*. Heppenheim: D'oro.
- Dias-Brito, D., & Castro, J. C. (2005). *Caracterização geológica e paleontológica do Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins. Relatório final*. Rio Claro: Universidade estadual Paulista.
- Dias-Brito, D., Rohn, R., Castro, J. C., Dias, R. R., & Rössler, R. (2007). Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional - O mais Exuberante e importante registro Florístico Tropical-Subtropical Permiano no Hemisfério Sul. In C. Schobbenhaus, D. A. Campos, E. T. Queiroz, M. Winge, M. L. C. Berbet-Born (Eds.), *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil* (pp. 1–15). <http://sigep.cprm.gov.br/sitio104/sitio104.pdf>. Accessed 15 January 2015.
- Dias-Brito, D., Rohn, R., Castro, J. C., Dias, R. R., & Rössler, R. (2009). Floresta petrificada do Tocantins setentrional: o mais exuberante e importante registro florístico Tropical-Subtropical Permiano no Hemisfério Sul. In C. Schobbenhaus, D. A. Campos, E. T. Queiroz, M. Winge, & M. L. C. Berbet-Born (Eds.), *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil* (pp. 337–554). Brasília: Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleontológicos, 2.
- DiMichele, W., Tabor, N., Chaney, D., & Nelson, W. (2006). From wetlands to wet spots: environmental tracking and the fate of the Carboniferous elements in Early Permian tropical floras (in wetlands through time). *Special Paper, Geological Society of America*, 399, 233–248.
- Dino, R., Antonioli, L., & Braz, S. M. N. (2002). Palynological data from the Trisidela Member of Upper Pedra de Fogo Formation (“Upper Permian”) of the Parnaíba Basin, Northeastern Brazil. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 3, 24–35.
- Douglass, A. E. (1928). *Climatic Cycles and Tree Growth*. Washington: Carnegie Institution of Washington.
- Falcon-Lang, H. J. A. (2000). Method to distinguish between woods produced by evergreen and deciduous coniferopsids on the basis of growth ring anatomy: a new tool. *Palaeontology*, 43(4), 785–793.
- Falcon-Lang, H. J. (2005). Intra-tree variability in wood anatomy and its implications for fossil wood systematic and palaeoclimatic studies. *Palaeontology*, 48(1), 171–183.
- Faria, L. E., Jr., & Truckenbrodt, W. (1980). Estratigrafia e petrografia da Formação Pedra de Fogo, Permiano da Bacia do Maranhão. *Anais do XXXI Congresso Brasileiro de Geologia*, 2, 740–754.
- Faria, R. S., Ricardi-Branco, F., Gianini, P. C. F., Sawakuchi, A. O., & Del Bem, L. E. V. (2009). *Lycopodiopsis derbyi* Renault from the Corumbataí Formation in the State of São Paulo (Guadalupean of Paraná Basin, Southern Brazil): new data from compressed silicified stems. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 158, 180–192.
- Francis, J. E. (1984). The seasonal environment of the Purbeck (Upper Jurassic) fossil forest. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeogeography*, 48, 285–307.
- Francis, J. E., & Poole, I. (2002). Cretaceous and early Tertiary climates of Antarctica: evidence from fossil wood. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 182, 47–64.
- Fritts, H. C. (1976). *Tree ring and climate*. San Francisco: Academic Press.
- Gerards, T., Yans, J., & Gerriene, P. (2007). Quelques implications paléoclimatiques de l'observation de bois fossiles du Wealdien du bassin de Mons (Belgique) - Résultats préliminaires. In P. Steemans, & E. Javaux (Eds.), *Recent Advances in Palynology. Carnets de Géologie/Notebooks on Geology, Brest, Mémoire 2007/01* pp. 29–34.
- Gibbs, M., Rees, P., Kutzbach, J., Ziegler, A., Behling, P., & Rowley, D. (2002). Simulations of Permian climate and comparisons with climate-sensitive sediments. *Journal of Geology*, 110(1), 33–55.
- Góes, A. M. O., & Feijó, F. (1994). Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 8, 57–67.
- Herbst, R. (1985). Nueva descripción de *Psaronius arrojadoidi* (Pelourde) (Marattiales) del Pérmico de Brasil. *Ameghiniana*, 21, 243–258.

- Herbst, R. (1992). Studies on Psaroniaceae. III. *Tietea derby* n. sp., from the Permian of Brazil. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, 147, 155–161.
- Herbst, R. (1999). Studies on Psaroniaceae. IV. Two species of *Psaronius* from Araguaina, State of Tocantins, Brazil. *Favens*, 15, 9–18.
- Kurzawe, F., Iannuzzi, R., Meerlotti, S., Rössler, R., & Rohn, R. (2013a). New gymnospermous woods from the Permian of the Parnaíba Basin, Northeastern Brazil, Part I: *Ductoabietoxylon*, *Scleroabietoxylon* and *Parnaiboxylon*. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 195, 37–49.
- Kurzawe, F., Iannuzzi, R., Meerlotti, S., & Rohn, R. (2013b). New gymnospermous woods from the Permian of the Parnaíba Basin, Northeastern Brazil, Part II: *Damudoxylon*, *Kaokoxylon* and *Taeniopitys*. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 195, 50–64.
- Lima Filho, F. P. (1999). *A sequência Permo-Pensilvaniana da Bacia do Parnaíba*. São Paulo: PhD thesis, Universidade de São Paulo.
- Lima, E. A. M., & Leite, J. F. (1978). Projeto estudo global dos recursos Minerais da Bacia sedimentar do Parnaíba. Integração geológico-metalogenética. *Relatório Final*. Recife, PE: DNPM/CPRM.
- Lodge, D. J. H., McDowell, W. H., & McSwiney, C. P. (1994). The importance of nutrient pulses in tropical forests. *Trends in Ecology & Evolution*, 9(10), 384–387.
- Matysková, P., Rößler, R., Götz, J., Leichman, J., Forbes, G., Taylor, E. L., Sakala, J., & Greygar, T. (2010). Alluvial and volcanic pathways to silicified plant stems (Upper Carboniferous–Triassic) and their taphonomic and palaeoenvironmental meaning. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 292, 127–143.
- Mesner, J. C., & Wooldridge, L. C. (1964). Maranhão Paleozoic Basin and Cretaceous Coastal Basins, Northern Brazil. *Bulletin of the American Association Petroleum Geologists*, 48(9), 1,475–1,512.
- Mussa, D., & Coimbra, A. M. (1987). Novas perspectivas de comparação entre as tafofloras permianas (de lenhos) das bacias do Parnaíba e do Paraná. *Anais da Sociedade Brasileira de Paleontologia*, 2, 901–923.
- Neregato, R., Rößler, R., Rohn, R., & Noll, R. (2015). New petrified Calamitaleans from the Permian of the Parnaíba basin. Central-North Brazil. Part I. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 215, 23–45.
- Nicolini, G., Tarchiani, V., Saurer, M., & Cherubini, P. (2010). Wood-growth zones in *Acacia seyal* Delile in the Keita Valley, Niger: is there any climatic signal? *Journal of Arid Environments*, 74, 355–359.
- Parrish, J. T. (1999). *Interpreting Pre-Quaternary Climate*. New York: Columbia University.
- Petri, S., & Fulfaro, V. J. (1983). Bacia do Parnaíba. In S. Petri & V. J. Fulfaro (Eds.), *Geologia do Brasil (Fanerozoico)* (pp. 110–117). São Paulo: Quieroz/EDUSP.
- Pinto, C. P., & Sad, J. H. G. (1986). Revisão da Estratigrafia da Formação Pedra de Fogo, borda sudoeste da Bacia do Parnaíba. *Anais Sociedade Brasileira Geologia*, 1, 346–358.
- Pires, E. F., Guerra-Sommer, M., & Scherer, C. M. S. (2005). Late Triassic climate in southernmost Parana Basin (Brazil): evidence from dendrochronological data. *Journal of South American Earth Sciences*, 18, 213–221.
- Pires, E. F., Guerra-Sommer, M., Bardola, T., & Veeck, G. P. (2011). Padrões de crescimento em lenhos gimnospermicos como indicadores paleoclimáticos na Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional (Permiano) Bacia do Parnaíba, Tocantins, Brasil. In F. Moraes (Ed.), *Contribuições à Geografia Física do Estado do Tocantins* (pp. 113–134). Goiânia: Kelps.
- Rees, P. M., Gibbs, M. T., Ziegler, A. M., Kutzbach, J. W., & Behling, P. J. (1999). Permian climates evaluating model predictions using global paleobotanical data. *Geology*, 27(10), 891–894.
- Rößler, R. (2006). Two remarkable Permian Petrified Forests: correlation, comparison and significance. In S. G. Lucas, S. G. Lucas, G. Cassinis, & J. W. Schneider (Eds.), *Non-Marine Permian Biostratigraphy and Biochronology* (pp. 39–63). London: Geological Society. Special Publications, 265.
- Rößler, R., & Galtier, J. (2002a). First *Grammatopteris* tree ferns from the Southern Hemisphere— new insights in the evolution of the Osmundaceae from the Permian of Brazil. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 121, 205–230.
- Rößler, R., & Galtier, J. (2002b). *Dernbachia brasiliensis* gen. nov. et sp. nov. — a new small tree fern from the Permian of NE Brazil. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 122, 239–263.
- Rößler, R., & Galtier, J. (2003). The first evidence of the fern *Botryopteris* from the Permian of the Southern Hemisphere reflecting growth form diversity. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 127, 99–124.
- Schneider, J. W., Kömer, F., Roscher, M., & Kroner, U. (2006). Permian climate development in the northern peri-Tethys area — the Lodève basin, French Massif Central, compare in a European and global context. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 240, 161–183.
- Schweingruber, F. H. (1992). Annual growth rings and growth zones in woody plants in southern Australia. *IWA Journal*, 13(4), 359–379.
- Schweingruber, F. H. (1996). *Tree rings and environmental dendroecology*. Birmensdorf, Zurich: Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research.
- Schweingruber, F. H. (2007). *Wood structure and environment*. Berlin: Springer.
- Tabor, N., & Montañez, I. (2002). Shifts in late Paleozoic atmospheric circulation over western equatorial Pangea: insights from pedogenic mineral $\delta^{18}\text{O}$ compositions. *Geology*, 30(12), 1127–1130.
- Tavares, T. M. V. (2012). *Estudos de Marattiales da “Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional” (Permiano, Bacia do Parnaíba)*. Rio Claro: PhD thesis, Universidade Estadual Paulista.
- Tavares, T. M. V., & Rohn, R. (2009). First record of petrified Permian pectopterids from the Paraná Basin, Brazil (Corumbataí Formation, Passa Dois Group, northeastern State of São Paulo): Morphology, anatomy and paleoecological implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 27, 60–73.
- Tavares, T. M. V., Rohn, R., Rößler, R., Feng, Z., & Noll, R. (2014). Petrified Marattiales pinnae from the Lower Permian of North-Western Gondwana (Parnaíba Basin, Brazil). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 201, 12–28.
- Vaz, P. T., Rezende, N. M., Filho, J. R. W., & Travassos, W. A. S. (2007). Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2), 253–263.



A new fossil fabaceae wood from the Pleistocene Touro Passo Formation of Rio Grande do Sul, Brazil



A NEW FOSSIL FABACEAE WOOD FROM THE PLEISTOCENE TOURO PASSO FORMATION OF RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL

JOSE RAFAEL WANDERLEY BENICIO¹, ETIENE FABBRIN PIRES², ÁTILA AUGUSTO STOCK DA ROSA³,
RAFAEL SPIEKERMANN¹, DIETER UHL^{1,4}, ANDRE JASPER^{1,4,*}

¹ Setor de Paleobotânica e Evolução de Biomas do Museu de Ciências Naturais, Centro Universitário UNIVATES, Avenida Avelino Tallini, 171, Bairro Universitário, Lajeado, CEP 959000, Rio Grande do Sul, Brazil; e-mail: ajasper@univates.br.

² Laboratório de Paleobiologia, Universidade Federal do Tocantins, Rua 03, Quadra 17, Setor Jardim dos Ipês, Porto Nacional CEP 77500000, Tocantins, Brazil.

³ Departamento de Geociências, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Avenida Roraima, 500, Bairro Camobi, Santa Maria CEP 97105900, Rio Grande do Sul, Brazil.

⁴ Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum, Senckenberganlage 25, 60325, Frankfurt am Main, Germany.

* corresponding author; phone number +(55)051-3714-7000, fax number +(55)051-3714-7001

Benicio, J. R. W., Pires, E. F., Da Rosa, A. A. S., Spiekermann, R., Uhl, D., Jasper, A. (2016): A new fossil Fabaceae wood from the Pleistocene Touro Passo Formation of Rio Grande do Sul, Brazil. – Fossil Imprint, 72(3-4): 251–264, Praha. ISSN 2533-4050 (print), ISSN 2533-4069 (on-line).

Abstract: A fossil angiosperm wood from the Touro Passo Formation (Pleistocene) in the northwestern part of Rio Grande do Sul State, Brazil, is described as the new fossil-taxon *Itaquixylon heterogenum* BENICIO, PIRES, DA ROSA, SPIEKERMANN, UHL et JASPER gen. nov. et sp. nov. The fossil wood is silicified, and is 9.9 cm in diameter and 16.6 cm in length, with small pith. The main anatomical features are diffuse porosity, vessels solitary and in radial multiples, simple perforation plates, alternate vested intervessel pits, vessel-ray and vessel-parenchyma pits bordered, axial parenchyma scanty paratracheal and vasicentric, heterocellular rays, non-septate fibers, extremely short and with simple pits, as well as distinct growth rings. The unique set of anatomical features allows the proposing of a new fossil-genus with an affinity to the subfamily Mimosoideae of the Fabaceae. This record extends the area from which fossil woods are known in the western portion of Rio Grande do Sul State. The systematic classification proposed here, adds a new fossil-taxon related to the currently diverse family Fabaceae, thus contributing to knowledge of past biodiversity on the basis of wood anatomy in this family during the Pleistocene of Southern Brazil.

Key words: Fossil wood, *Itaquixylon heterogenum* gen. nov. et sp. nov., Fabaceae, Mimosoideae, Touro Passo Formation, Rio Grande do Sul State, Brazil

Received: November 16, 2016 | Accepted: December 2, 2016 | Issued: December 30, 2016

Introduction

The Touro Passo Formation (Pleistocene – Holocene) in the northwestern part of the Rio Grande do Sul State, is one of the most important sources of information about Late Pleistocene palaeobiodiversity in Southern Brazil. The recorded fossil content of the formation includes vertebrates (e.g. Scherer and Da Rosa 2003, Kerber and Oliveira 2007, 2008, Hsiou 2007, Ribeiro et al. 2009, Oliveira and Kerber 2009), invertebrates (Oliveira and Milder 1990, Kotzian and Simões 2006, Erthal et al. 2015) and wood (Bolzon et al. 1991, Bolzon 1997, 1999, Bolzon and Oliveira 2000, Pires and Da Rosa 2000, Bolzon and Marchiori 2002).

The taxonomic studies of fossil woods recorded from the Cenozoic of South America, together with information about geology, climate and plant geography, allows us to infer

patterns of taxonomic similarities and endemisms, which can be used to reconstruct palaeoenvironmental patterns as well as changes in plant diversity over time (e.g. Franco and Brea 2013, Moya and Brea 2015). The occurrence of Cenozoic fossil angiosperm wood is documented in several regions of South America, with published records from Argentina (e.g. Kräusel 1925, Brea 1995, Franco and Brea 2010, Moya and Brea 2015) Colombia (e.g. Schönfeld 1947, Mirioni 1965, Pons 1969), Chile (e.g. Gonzalez 1981, Torres and Rallo 1981, Nishida et al. 1990), Peru (Salard 1961, 1963), and Uruguay (e.g. Gros 1992). In Brazil 21 fossil-genera based on angiosperm wood have been so far recognized from Cenozoic deposits (e.g. Silva-Curvello 1935, Mussa 1958, 1959, Suguui 1971, Suguui and Mussa 1978, Bolzon 1999, Bolzon and Marchiori 2002). These fossils are distributed in 11 botanical families and several of them belong to the family Fabaceae.

The Fabaceae or Leguminosae includes approximately 730 genera and 19,400 species of trees, shrubs, herbs and vines with a worldwide geographical distribution (Lewis et al. 2005). The fossil record of Fabaceae is composed of permineralized wood, leaves, flowers, fruits and pollen, and the oldest (questionable) fossils of the family are permineralized stems from the Upper Cretaceous of Sudan (Giraud and Lejal-Nicol 1989). In the Rio Grande do Sul State, southernmost portion of Brazil, four fossil-species of wood related to Fabaceae (*Santanoxylon marchiorii*, *Santanoxylon guerrasommeri*, *Quaraoxylon gracillis*, *Ramboxylon sanpedrensis*) were described by Bolzon (1999).

The aim of the present study is the anatomical description and characterization of a large fragment of well-preserved fossil wood, collected in the Northwest of Rio Grande do Sul State, in order to improve and extend the existing information about Quaternary fossil wood occurring in sediments of the southern part of Brazil.

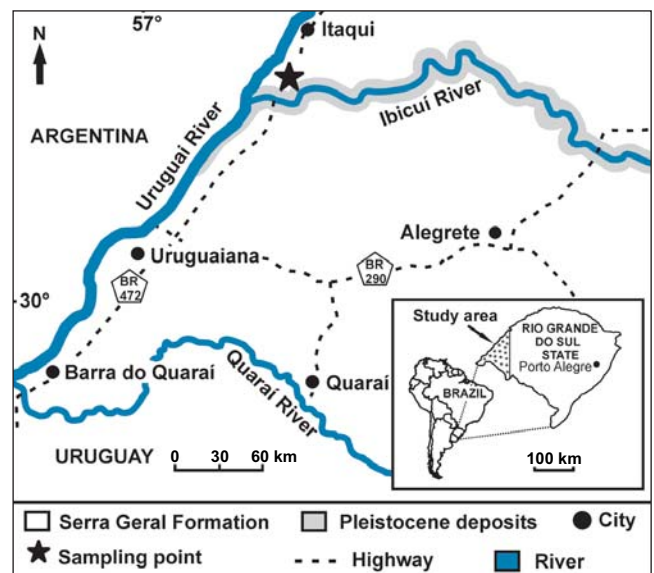
Geological setting

According to Da Rosa (2009), the continental Pleistocene and Holocene sediments of Rio Grande do Sul State consist of alluvial deposits occurring in isolated and thus difficult to correlate terraces. These deposits are generally related to recent and sub-recent drainages, and they are usually considered in the context of two separate basins, i.e. the Uruguay and the South Atlantic Basin.

The post-Cretaceous geological history of Rio Grande do Sul consists of river deposits, on top of the magmatic rocks of the Serra Geral Formation (Lisboa and Schuck 1990). Over the past few thousand years, several alluvial cycles produced superimposed sediments, resulting in extensive plains in the western part of Rio Grande do Sul, usually covered by vegetation. These deposits are equivalent to the plaining surfaces described by Ab'Saber (1969), Lisboa and Schuck (1990) and Lisboa (1990).

The material studied here comes from an outcrop located in the Itaqui municipality, in the Northwest of Rio Grande do Sul State, at 29°23'55.9"S/56°42'05.9"W (Text-fig. 1). The geological profile of the outcrop demonstrates the occurrence of a palaeo-river cycle followed by a modern river and soil formation (Text-fig. 2). The outcropping levels in the study area can be correlated to the Touro Passo Formation, as described by Bombin (1976), which is recognized in several drainages in the Uruguai region, belonging to the Uruguay River Basin. Da Rosa (2009) characterizes the Touro Passo Formation as a sedimentary deposit over magmatic rocks on the top of the Serra Geral (Paraná Basin).

According to Bombin (1976), the Touro Passo Formation consists of conglomeratic deposits (Rudáceo Member) and mudstone (Lamítico Member), deposited by the so called Touro Passo river after the Last Glacial Maximum (LGM). The Rudáceo Member consists of a polymictic ortho-cluster with metaquartzitic phenocrysts, basalt, chalcedony and calcium carbonate concretions. The Lamítico Member consists of silt-clay sediments and silty sand lenses. The Rudáceo Member probably represents an accumulation of palaeosoils and soil removed by rain during a period of transition to more humid climates,



Text-fig. 1. Map of westernmost part of Rio Grande do Sul showing the position of the sampling locality (star). Adapted from Oliveira and Kerber (2009).

during which the deposition of the Lamítico Member took place.

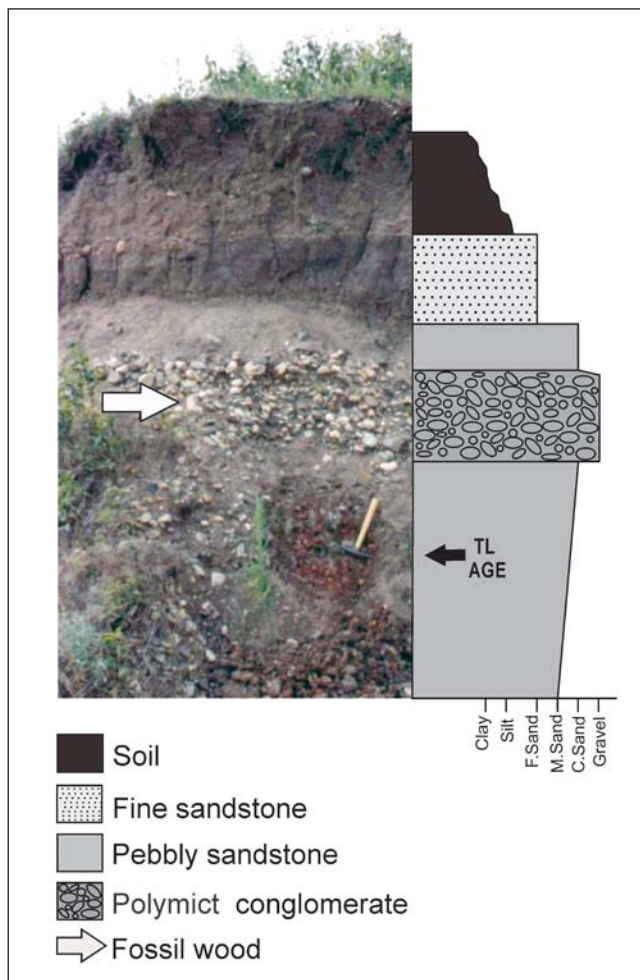
Further studies by Oliveira and Lavina (2000) considered that the members defined by Bombin (1976) characterize only a local sedimentation episode. Nevertheless, the formal name Touro Passo Formation has been widely used in the literature for comparable deposits (cf. Oliveira and Kerber 2009).

The Touro Passo Formation was proposed formally by Bombin (1975, 1976) as well as Bombin and Klamt (1976), and was assigned to the Late Pleistocene – Holocene. Deposits from a similar age are also known from northern Argentina (Tonni et al. 2003). Considering the age of the formation, data obtained by Milder (2000) suggested a multicyclic and diachronous sedimentary regime, as indicated by ages ranging up to 42,000 years BP.

Pires and Da Rosa (2000) used thermoluminescence to date sediments assigned to the Touro Passo Formation, and reported an age of 14,600 years (Pleistocene) for the fossil bearing conglomerate layer of the locality studied here and 8,200 years (Holocene) for the sandy-silty-clay layer ($\pm 4.6\%$ SD). Da Rosa (2009) also used the same technique to date the sandstones and conglomerates from the Touro Passo Formation in the Itaqui municipality, suggesting ages between 6,400 and 42,900 years BP.

Materials and methods

The material studied consists of a fragment of fossil wood, stored in the Palaeontological Collection of the Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), under accession number UFSM 12032. The fossil wood was recovered from a conglomeratic matrix, with horizontal orientation (Text-fig. 2). This specimen was mentioned previously by Pires and Da Rosa (2000), while dealing with mineralogical aspects of the specimen and the age of the source sediments.

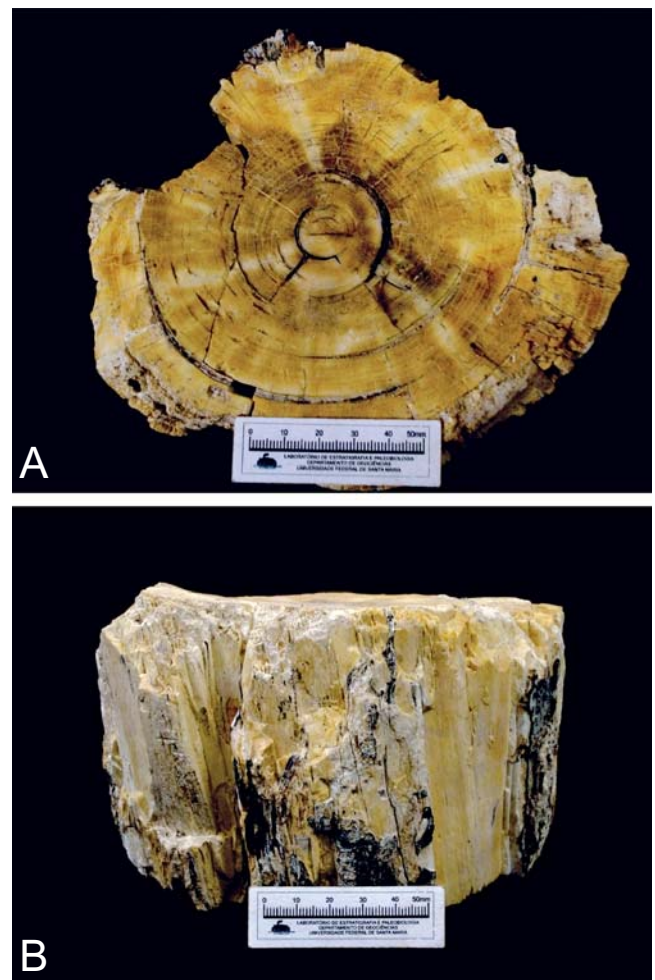


Text-fig. 2. Field photograph of the sampling locality, together with a schematic profile. Stratigraphic horizon from which the fossil wood fragment was extracted (white arrow) (Modified from Pires and Da Rosa 2000).

The fossil wood is silicified (*sensu* Schopf 1975), and has a diameter of 9.9 cm and a length of 16.6 cm. The primary xylem, external cortex and phloem are not preserved. The surface is irregular, yellowish to black, and the inner surface exhibits yellowish to beige colors (Text-fig. 3).

According to standard methodology for the analysis of fossil woods, a total of seven thin sections were prepared in transverse, tangential longitudinal and radial longitudinal orientation. These are deposited in the Paleontology Collection (CPALEOUFT) at the Universidade Federal do Tocantins (UFT) under accession numbers UFT 0456, 0457, 0458, 0459, 0460, 0461 and 0462. The anatomical details were observed and photographed using a light microscope coupled to a digital camera (Leica DM LB2).

The description of the anatomical features of the wood followed the procedures recommended by the International Association of Wood Anatomists, list of microscopic features for hardwood identification (IAWA Committee 1989). The identification and classification of the fossil wood was made following Metcalfe and Chalk (1950), Cozzo (1951), Tortorelli (1956), Baretta-Kuipers (1981), Wheeler and Bass (1992), Carlquist (2001), Evans et al. (2006) in addition to the InsideWood web site (<http://insidewood.lib.ncsu.edu/>



Text-fig. 3. Longitudinal (A) and lateral (B) views of the fossil wood (UFSM 12032), highlighting the preservation of growth rings.

search, accessed:15/10/2016). The systematic assignment followed the Angiosperm Phylogeny Group (APG III 2009).

Due to the varying states of tissue preservation in the different sections, it was not possible to perform the same number of measurements for all anatomical characters analyzed. Nevertheless, we made at least 25 measurements on each thin section analyzed, for all quantitative values utilized to produce the anatomical description.

Systematic palaeobotany

Order **Fabales** BROMHEAD, 1938

Family **Fabaceae** LINDLEY, 1836

Subfamily **Mimosoideae** CANDOLLE, 1825

Genus ***Itaquixylon*** BENICIO, PIRES, DA ROSA, SPIEKERMANN, UHL et JASPER gen. nov.

Type species. *Itaquixylon heterogenum* BENICIO, PIRES, DA ROSA, SPIEKERMANN, UHL et JASPER sp. nov.

Etymology. Generic name, *Itaquixylon*, refers to Itaqui city, where the type species was found.

Diagnosis. The same as for species.

***Itaixylon heterogenum* BENICIO, PIRES, DA ROSA,
SPIEKERMANN, UHL et JASPER sp. nov.**

Holotype. UFSM 12032 (Repository: Coleção Paleontológica da Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brazil).

Etymology. The specific name, *heterogenum*, is due to the presence of heterocellular rays.

Type horizon. Touro Passo Formation.

Age. Late Pleistocene, 14,600 years (TL).

Type locality. (29°23'55.9"S/56°42'05.9"W), Itaqui city, Rio Grande do Sul State, Brazil.

Diagnosis. Angiosperm wood, diffuse porosity, numerous vessels in tangential bands; vessels generally solitary, sometimes in radial multiples of 3 to 5, circular to oval in outline, with narrow diameter and short length, helical thickenings absent, tyloses present; simple perforation plates; alternate intervessel pits, vestured, circular, small with lenticular irregular aperture slightly oblique; vessel-ray pits and vessel-parenchyma pits bordered; libriform fibres, non-septate, extremely short and narrow, with simple minute pits; paratracheal axial parenchyma, vasicentric and scanty and apotracheal axial parenchyma diffuse; rays are numerous, exclusively heterocellular, composed of procumbent and square marginal cells, short and extremely narrow, simple pits of minute size; mostly uniseriate, less frequently biseriate and triseriate, rarely tetraseriate; aggregate rays are absent.

Description. Distinctive growth rings, alternately separated by light and dark bands (Pl. 1, Fig. 1), marked by radially flattened thick-walled latewood fibres versus thin-walled earlywood fibers. Absence of stratification in secondary xylem elements. Wood diffuse-porous (Pl. 1, Figs 1–2). Vessels in tangential bands (Pl. 1, Figs 1–2), numerous (16–36/mm²), occupying 25.6% of the cross section (Pl. 1, Figs 1–2). Vessels generally solitary, sometimes in radial multiples of 3 to 5, circular to oval in outline (Pl. 1, Figs 2–3). Mean tangential diameter 65.5 (32–96) µm, mean length 186.5 (48–360) µm. Helical thickenings in vessel elements are absent. Simple perforation plates (Pl. 2, Fig. 4), intervessel pits alternate, small 4.1 (2–8) µm, vestured, with lenticular irregular slightly oblique apertures (Pl. 1, Figs 4–5). Vessel-ray pits with distinct borders, rounded and bordered (Pl. 1, Figs 4–5). Vessel-parenchyma pits are similar to vessel-ray pits. Tyloses (Pl. 1, Figs 2–6) and prismatic crystals are present in the marginal square ray cells (Pl. 2, Figs 4–6). Fibres libriform, non-septate, with simple and minutely bordered pits 2.3 (1–4) µm (Pl. 2, Figs 1–4), occupying 45% of the wood. The fibres are extremely short, mean length 162 (30–360) µm, narrow 3.2 (1–8) µm and thin-walled 1.9 (1–4) µm, with a narrow diameter of 3.9 (2–8) µm. The paratracheal axial parenchyma is vasicentric and scanty, occupying only 5.45% of total wood volume (Pl. 1, Figs 2–3). The apotracheal axial parenchyma is diffuse, with dispersed cells between the fibers (Pl. 1, Fig. 2–3). Axial parenchyma cells are rectangular (Pl. 2, Fig. 2), mean length 36.9 (16–80) µm and mean width 18.5 (8–32) µm, constituting a series with mean length 364.8 (176–896) µm, composed of 13 (3–6) cells. Rays are numerous, occupying

24% of the volume of the wood (Pl. 1, Figs 1–2). They are mostly uniseriate (44%), less frequent biseriate (27%), triseriate (21%) and tetraseriate (8%) (Pl. 2, Figs 1–3). Aggregate rays are absent. Rays are heterocellular, composed of procumbent cells and 1–4 rows of square marginal cells, most commonly 2 rows (Pl. 2, Figs 4–5). Uniseriate rays extremely short, mean length 204.9 (112–424) µm, and extremely narrow, mean width 12.4 (8–24) µm, 7 to 27 cells high (Pl. 2, Figs 1–3). The multiseriate rays are narrow, mean width 26.8 (16–40) µm, 1 to 4 cells wide, and very short, mean length 241.5 (120–556) µm, 8 to 27 cells high (Pl. 2, Figs 1–3). In tangential section, the ray cells are circular to oval (Pl. 2, Figs 1–3) with minute simple pits, ranging from 1 to 4 µm.

Comparison

Comparisons with extant taxa. The synapomorphies that connect the fossil wood described here with the Fabales are the presence of vestured intervessel pits and vessel elements with simple perforation plates (Judd et al. 2007). Moreover, the combination of anatomical characteristics such as diffuse porous, short vessels solitary and in radial multiples, simple perforation plates, alternate and vestured intervessel pits, non-septate libriform fibres with simple small pits are synapomorphies which suggest that the fossil here investigated has an affinity with the Fabaceae (Metcalf and Chalk 1950, Cozzo 1951, Tortorelli 1956, Baretta-Kuipers 1981, Wheeler and Baas 1992, Barros and Callado 1997, Evans et al. 2006).

The Fabaceae have been traditionally considered as a monophyletic family, composed of three subfamilies, Caesalpinioideae, Mimosoideae and Papilionoideae (Metcalf and Chalk 1950, Polhill et al. 1981, Thorne 1992, Judd et al. 2007). Considering the combination of anatomical features, diffuse porosity, solitary to multiple vessels, simple perforation plates, alternate and vestured intervessel pits, vessel-ray and vessel-parenchymal bordered pits, parenchyma paratracheal vasicentric scanty, and extremely short fibres with simple pits, it is possible to assign this fossil wood to the Mimosoideae. This subfamily has a global geographical distribution and is composed of approximately 60 genera, with *Acacia*, *Mimosa* and *Inga* the most species-rich genera (Elias 1981).

The fossil wood analyzed here is most similar to taxa of the tribe Mimosae, especially to the *Piptadenia* group, which is considered as monophyletic and consists of eight genera (Luckow et al. 2003, Evans et al. 2006, Jobson and Luckow 2007) (Tab. 1). Despite such a grouping there is considerable variation in wood anatomy between species of the same genus, the main diagnostic features of the *Piptadenia* group are: vessels mostly small to medium in size, with high density, radial multiples and clusters ranging from rare to common, which can be large or small, variable intervessel pit size, septate and non-septate fibres, axial parenchyma ranging from scanty to banded, and in many cases confluent parenchyma linking many vessels leading to an almost banded appearance, rays are commonly 2–3 cells wide and uniseriate rays are always present (Evans et al. 2006).

Table 1. Anatomical features of Piptadenia group (Tortorelli 1956, Evans et al 2006 and InsideWood – on-line database at insidewood.lib.ncsu.edu/search; available since 2004, accessed on 15/10/2016)).

Abbreviations: Growth rings: A – absent, D – distinct, I – indistinct, Radial multiples: R – rare (<10%), O – occasional (10–30%), F – frequent (30–60%), C – common (60–80%), VC – very common (>80%), Clusters: R – rare (<10%), O – occasional (10–30%), F – frequent (30–60%), C – common (60–80%), N – not observed, Septate fibers: P – present, N – not present, Axial parenchyma: A – aliform, V – vasicentric, S – scanty paratracheal, C – confluent, B – banded, Axial parenchyma confluent: N – not observed, R – rare, O – occasional, F – frequent, C – common, VC – very common, Number of vessels linked: number of vessels or groups of tangential vessels included in confluent parenchyma, Ray type: H – homocellular, He – heterocellular, Crystals: F – present in the fibers, A – present in axial parenchyma, R – present in rays cells.

Taxa	Growth Rings	Tangential vessel diameter (µm)	Vessels/mm	Radial Multiples	No. of Vessels	Clusters	No. of Vessels/ Cluster	Intervessel pit diameter(µm)	Fiber Wall Thickness	Septate Fibers	Axial Parenchyma	Axial Parenchyma Confluent	No. of vessels linked	Ray Height/N° cells	Ray Height (µm)	Rays/ mm	Ray Width	Ray Type	Crystals
<i>Anadenanthera</i> SPEGAZZINI	D	86–98	50–57	F–C	2–7	O–F	2–7	6–9	Thick	N	V/A	F–VC	2–8+	11–17	246	8	1–40	H	F, A
<i>Microlobius</i> PRESL	A–I	42–110	7–30	F–C	1–4	R–C	2–4+	?	Thin–thick	N	V/A/C/B	F	2–(many)	?	800	8–12	1–2(3)	H	F, A
<i>Mimosa</i> LINNAEUS	A–I	79–112	15–50+	F/VC	2–10	R–C	2–5(10)	3–6	Thin–thick	P/N	V–C	C–VC	2–6+	8–130	20–250	6–15	1–3	H/He	F, A
<i>Parapiptadenia</i> BRENNAN	A–D	112–123	23–30+	O/VC	2–7	R/O–F	2–7	3–9	Med–thick	P/N	V/A	O–C	2–4+	11–24	30–450	8–10	1–3	H/He	F, A
<i>Parkia</i> BROWN	D–I	160–241	3–9	R–F	2–5(6)	N/R–F	2–8	4–9	Thin–med	N	A–C	R–VC	2–7+	14–19	20–380	4–7	1–4	H	F, A
<i>Piptadenia</i> BENTHAM	D–I	54–170	13–50+	R–C	2–9(15)	R–F	2–7+	4–12	Thin–thick	P	V–B	N–C	2–7+	12–24	20–620	5–13	1–2(4)	H/He	F, A
<i>Pseudopiptadenia</i> RAUSCHERT	D	142	20	O/F	2–4(7)	R/O	3–6(12)	3–6	Thin–med	N	V–A	R–O	2–3	ca. 15	20–260	ca. 7	1(2)	H	F, A
<i>Stryphnodendron</i> MARTIUS	D–I	95–133	14–33	F–C	2–7	R/O	2–4	6–12	Thin–med	N	S–A	N–O	N/2	ca. 8	20–170	9–11	1(2)	H	F, A
<i>Itaquixylon</i> gen. nov.	D	40–96	20–30	R–O	1–6	R	2–5	2–8	Thin	P	V/S	N	N	7–27	112–424	2–8	1–4	He	R

Although the anatomy of wood is heterocellular in the subfamily Mimosoideae, the combination of anatomical features of the fossil wood described here suggest a strong affinity with the genus *Mimosa* (Tab. 1). The wood anatomy of this genus is poorly investigated, probably due the limited economic interest in these plants (Marchiori 1996a). However, it is well established that the genus *Mimosa* presents a wide variation in wood anatomy, being classified as “structurally heterocellular”, due to the absence of a common set of anatomical characters (Cozzo 1951).

The genus *Mimosa* currently comprises ca. 510 species. These plants are predominantly American, with a few representatives in Africa and Asia. In the Americas the genus is present in all warm regions, from the southern United States to Uruguay and central Argentina (Burkart 1952). For the extant Brazilian species, descriptive studies have so far been published for *Mimosa scabrella* (Richter and Charvet 1973, Marchiori 1980), *Mimosa bimucronata* (Marchiori 1980, 1993), *Mimosa daleoides* (Marchiori 1982), *Mimosa cruenta* (Marchiori 1985), *Mimosa eriocarpa* (Carnieletto and Marchiori 1993), *Mimosa sparsa* (Maccari and Marchiori 1994), *Mimosa artemisiana* (Paula 1995), *Mimosa incana* (Marchiori 1996a), *Mimosa berroi* (Marchiori 1996b), *Mimosa uruguensis* (Marchiori 1996c), *Mimosa trachycarpa* (Marchiori and Muñiz 1997a), *Mimosa pilulifera* (Marchiori

and Muñiz 1997b), *Mimosa ophthalmocentra* (Dias-Leme et al. 2010, Silva et al. 2011), *Mimosa tenuiflora* (Dias-Leme et al. 2010, Silva et al. 2011), *Mimosa micropteris* (Pereira et al. 2013), *Mimosa flocculosa* (Pereira et al. 2014), *Mimosa ramulosa* (Tomasi et al. 2015, Machado and Marchiori 2016) and *Mimosa parvipinna* (Machado and Marchiori 2016). Of these species, this fossil wood has a close affinity to the southern Brazilian species *M. flocculosa*, *M. micropteris*, *M. ramulosa* and *M. parvipinna*, which share several secondary xylem anatomical features, such as diffuse porosity, numerous vessels which are solitary and in radial multiples, simple perforation plates, alternate vested intervessel pits, scanty paratracheal and vasicentric axial parenchyma, heterocellular rays, and extremely short libriform fibres with simple pits.

Comparisons with fossil woods. The fossil record of Mimosoideae wood is currently represented by 24 fossil-taxa (Tab. 2). The fossil-genera *Euacacioxylon*, *Metacacioxylon*, *Mimosaceoxylon* and *Dichrostachyoxydon* differ from the fossil here investigated by the presence of wide homocellular rays, medium-sized intervessel pitting as well as axial parenchyma pattern (Tab. 2). The fossil-genera *Ingoxylon*, *Albizzinium* and *Cathormion* differ from the fossil here investigated by the presence of slightly wider homocellular

Tabela 2. Comparison of the characters of the Mimosoideae fossil genera. Adapted from Gros (1992).

Fossil genus	Vassels	Intervascular pitting size	Ray type	Ray width	Axial parenchyma type	Fiber type
<i>Adenantheroxylon</i> PRAKASH et TRIPATHI, 1968	Mostly solitary	–	Homocellular	1–3 seriate	Diffuse, vasicentric to aliform, confluent	Nonseptate
<i>Albizzinium</i> PRAKASH, 1975	Mostly solitary	Medium	Homocellular	1–6 seriate	Diffuse, vasicentric to mostly aliform, occasionally terminal	Septate
<i>Cathormion</i> GROS, 1994	Predominantly solitary	–	Homocellular	1–6 seriate	Vasicentric aliform to confluent	Generally septate
<i>Albizzioxylon</i> NIKITIN, 1935	Solitary, some in radial groups	–	–	–	Paratracheal	–
<i>Dichrostachyoxylon</i> MÜLLER-STOLL et MÄDEL, 1967	Solitary; radial small groups	Medium	Homocellular, slightly heterocellular	1–10 seriate	Narrow vasicentric; frequently slightly aliform; rarely confluent; terminal or initial	Nonseptate
<i>Euacacioxylon</i> MÜLLER-STOLL et MÄDEL, 1967	Solitary and in radial small groups	Medium	Homocellular	1–10 seriate	Aliform, often confluent and small or long tangential bands	Nonseptate
<i>Ingoxylon</i> MÜLLER-STOLL et MÄDEL, 1967	Solitary or in radial groups	Medium	Homocellular	1–5 seriate	Vasicentric, wide aliform; rarely confluent, mostly diffuse	Septate
<i>Metacacioxylon</i> GROS, 1981 (apud Kloster et al. 2015)	Mostly solitary, and small groups	Medium	Homocellular	1–18 seriate	Vasicentric to aliform, and in oblique bands	Nonseptate
<i>Mimosaceoxylon</i> MÜLLER-STOLL et MÄDEL, 1967	Solitary, radial multiples and clusters	Medium	Homocellular	1–9 seriate	Usually paratracheal and diffuse strands	Septate?
<i>Prosopisinoxylon</i> MARTÍNEZ, 2010	Vassels of two distinct diameter classes; solitary, radial multiplex and clusters	Small to medium	Homocellular	1–9 seriate	Paratracheal vasicentric, aliform and confluent to banded; apotracheal diffuse	Nonseptate
<i>Anadenantheroxylon</i> BREA et al., 2001	Solitary, radial multiplex of 2–4 and clusters	–	Homocellular	1–2 seriate	Paratracheal vasicentric and confluent	Nonseptate
<i>Piptadenioxylon</i> SUGUIO et MUSSA, 1978	Solitary, rarely radial multiple	Small	Homocellular	2–3 seriate	Vasicentric	Nonseptate
<i>Paraalbizzioxylon</i> GROS, 1992	Solitary and radial multiple	Small to medium	Homocellular	1–6 seriate	Paratracheal, in some cases apotracheal, diffuse, terminal	Septate and nonseptate
<i>Paracacioxylon</i> MÜLLER-STOLL et MÄDEL, 1967	Solitary, radial multiplex of 2–4 and clusters	Small to medium	Homocellular	1–6 seriate	Paratracheal vasicentric, aliform, confluent; apotracheal diffuse	Septate and nonseptate
<i>Acacioxylon</i> SCHENK, 1883	Predominantly solitary	–	Homocellular	1–3 seriate	Paratracheal, uniseriate apotracheal in bands	Libriform
<i>Mimosoxylon</i> MÜLLER-STOLL et MÄDEL, 1967	Solitary, radial multiple	Small to medium	Homocellular, rarely weakly heterocellular	1–3 seriate	Narrow vasicentric, partly weakly aliform, rare confluent, terminal or initial	Nonseptate
<i>Tetrapleuroxylon</i> MÜLLER-STOLL et MÄDEL, 1967	Solitary and radial multiplex	Medium	Homocellular to weakly heterocellular	1–5 seriate	Vasicentric aliform, partly confluent, terminal or initial	Nonseptate
<i>Menodoxylon</i> LUTZ, 1979	Predominantly solitary, radial multiplex of 2–3	Small to medium	Homocellular to heterocellular	1–3 seriate	Vasicentric aliform, shorts bands	Nonseptate, sporadically septate
<i>Zygiaxylon</i> KLOSTER et al., 2015	Solitary and multiples	Small to medium	Homocellular	1–2 seriate	Paratracheal vasicentric, aliform to confluent forming irregularly wide bands of 4–10 cells height	Nonseptate
<i>Abaremaxylon</i> MOYA et BREA, 2015	Solitary, radial multiples of 2–4 and clusters	Small to Medium	Homocellular	1 seriate	Paratracheal vasicentric, aliform, unilateral aliform and confluent	Nonseptate
<i>Cylicodiscuxylon</i> MOYA et BREA, 2015	Solitary, radial multiples of 2–5 and clusters	Small to Medium	Homocellular	1–3 seriate	Paratracheal vasicentric, aliform, unilateral aliform and confluent	Nonseptate
“ <i>Quaraoxylon</i> ” (Bolzon 1999; nom. nud.)	Mostly solitary	Small to medium	Homocellular	1–3	Paratracheal in aliform bands, confluent, apotracheal diffuse	Libriform, nonseptate
“ <i>Ramboxylon</i> ” (Bolzon 1999; nom. nud.)	Mostly solitary	Small to medium	Homocellular	1–3	Paratracheal vasicentric to aliform confluent, apotracheal diffuse	Libriform, nonseptate
“ <i>Santanoxylon</i> ” (Bolzon 1999; nom. nud.)	Mostly solitary	Small to large	Homocellular	1–3	Paratracheal vasicentric, or aliform confluent	Libriform, nonseptate
<i>Itaquiexylon</i> gen. nov.	Solitary to multiple	Small	Homocellular	1–4	Paratracheal vasicentric scanty, apotracheal diffuse	Libriform, nonseptate

rays and septate fibres (Tab. 2). Moreover, *Adenantheroxylon* and *Acacioxylon* differ from the fossil here studied by the presence of homocellular rays, 1–3 seriate and by parenchyma

arrangement (Tab. 2). A comparison with the fossil-genus *Albizzioxylon* was impossible, due to incomplete anatomical information.

In South America, the fossil wood record of the subfamily Mimosoideae is represented by the fossil-genera *Mimosoxylon*, *Tetrapleuroxylon*, *Paracacioxylon*, *Piptadenioxylon*, *Menendoxylon*, *Anadenantheroxylon*, *Prosopisinoxylon*, *Microlobiusxylon*, *Paraalbizzioxylon*, *Zygiaxylon*, *Abaremaxylon* and *Cylicodiscuxylon*. Moreover, Bolzon (1999) described three new fossil-genera (*Santanoxylon*, *Quaraoxylon*, *Ramboxylon*) related to Mimosoideae. However, according to the International Code of Nomenclature (ICN) for algae, fungi, and plants (McNeill et al. 2012), these fossil-genera attributed to Mimosoideae have to be considered as nomina nuda, since the description of these fossil-taxa is part of an unpublished doctoral thesis (Tab. 2).

The fossil-genera *Paraalbizzioxylon* and *Paracacioxylon* differ from the fossil here investigated by the presence of homocellular rays, 1–6 seriate, small and medium size intervacular pitting and septate to non-septate fibres (Tab. 2). *Prosopisinoxylon* differs from the fossil here investigated by the presence of vessels of two distinct diameters, small to medium-sized intervacular pitting and homocellular rays 1–9 seriate (Tab. 2), while *Piptadenioxylon* differs from the fossil here studied by the presence of homocellular rays 2–3 seriate (Tab. 2). The fossil-genera *Mimosoxylon* and *Menendoxylon* differ from the fossil by the presence of small to medium-sized intervessel pitting, homocellular to heterocellular (heterocellular only rarely in *Mimosoxylon*) rays 1–3 seriate and by parenchyma pattern (Tab. 2), while *Cylicodiscuxylon* differs from the fossil studied by the presence of small to medium-sized intervessel pitting, exclusively homocellular rays 1–3 seriate and parenchyma arrangement (Tab. 2). *Anadenantheroxylon*, *Abaremaxylon*, *Zygiaxylon* differ from the fossil studied by the presence of small to medium-sized intervessel pitting, exclusively homocellular narrow rays and parenchyma arrangement (Tab. 2). Moreover, the fossil-genus *Tetrapleuroxylon* differs from the fossil studied by the presence of medium-sized intervessel pitting, homocellular, weakly heterocellular 1–5 seriate rays, and by parenchyma arrangement (Tab. 2).

The fossil woods described by Bolzon (1999) and the fossil wood described here are from the same region of the Rio Grande do Sul State, the southernmost part of Brazil. They were extracted from a similar depositional environment which might present similar or at least comparable age. The three fossil-genera proposed by Bolzon (1999), *Quaraoxylon*, *Ramboxylon* and *Santanoxylon* are similar to each other, with predominantly solitary vessels, alternate intervacular pitting, homocellular rays 1–3 seriate and libriform non-septate fibres, differing in intervacular pitting size and parenchyma type (Tab. 2). The fossil studied here differs from *Ramboxylon*, *Santanoxylon* and *Quaraoxylon* in particular by the presence of exclusively well-defined heterocellular rays 1–4 seriate, exclusively small intervacular pitting and by parenchyma arrangement (Tab. 2).

Although the fossil wood studied here shares anatomical elements with the fossil Mimosoideae fossil-genera that have already been described, the unique set of anatomical characters and the presence of exclusively heterocellular rays, allow the erection of the new fossil-genus and fossil-species *Itaquixylon heterogenum* from the Pleistocene of the Rio Grande do Sul State in Brazil.

Final remarks

Silicified angiosperm fossils from the Cenozoic of South America are abundant, and several species related to Fabaceae have been described based on wood anatomical patterns, demonstrating that this family had a relatively high palaeobiodiversity (i.e. species richness) during this time (Pujana et al. 2011). The family is widely distributed in South America, ranging from the southernmost region of Patagonia to northern Colombia, and is mostly represented by fossil wood from the subfamily Mimosoideae (61%) rather than Caesalpinioideae and Papilionoideae (39%) (Pujana et al. 2011, Moya and Brea 2015). In Rio Grande do Sul Cenozoic fossil woods, assigned to the Touro Passo Formation, have been known for more than two decades (Bolzon et al. 1991, Bolzon 1997, 1999, Pires and Da Rosa 2000, Bolzon and Marchiori 2002). Until now only four fossil-species and three fossil-genera of Fabaceae (*Santanoxylon marchiorii*, *S. guerrasommeri*, *Quaraoxylon gracillis*, *Ramboxylon sanpedrensis*) are known from Rio Grande do Sul (Bolzon 1999). However, these fossil genera are invalid, since their formal and nomenclaturally valid descriptions have still not been published in the scientific literature.

The fossil wood investigated here shows anatomical characters which are related to the Fabaceae, especially to the subfamily Mimosoideae. Due the unique combination of anatomical characteristics, especially the well-defined heterocellular rays, the fossil studied here differs from all the Mimosoideae fossil woods described until now, and thus is interpreted as the new fossil-taxon *Itaquixylon heterogenum* gen. nov. et sp. nov. According to Baretta-Kuipers (1981), the presence of heterocellular rays is not a common characteristic of the subfamily Mimosoideae, since ray heterogeneity is considered as an anatomical character related to the low ray specialization, and probably assigned to a more primitive group. However, the frequent occurrence of heterocellular rays is well documented in the scientific literature in extant Brazilian Mimosoideae, such as *M. daleoides*, *M. eriocarpa*, *M. pilulifea*, *M. incana*, *M. sparsa*, *M. micropteris*, *M. flocculosa*, *M. ramulosa* and *M. parvipinna* (Marchiori 1982, Carneletto and Marchiori 1993, Maccari and Marchiori 1994, Marchiori 1996a, Marchiori and Muniz 1997a, Pereira et al. 2013, 2014, Tomasi et al. 2015, Machado and Marchiori 2016).

Pires and Da Rosa (2000) identified the permineralization agent of the wood described herein as opal-CT using X-ray-diffraction. This mineral corresponds to a form of silica, with crystallinity intermediate between opal, cristobalite and tridymite (Brindley and Brown 1980). The fossilization of the wood described here corroborates the observations made by Buurman (1972) and Mussa and Coimbra (1984), who concluded that the degree of preservation of cellular structures in opalized fossils is higher than in specimens with quartz microcrystalline structure. The horizontal position of the wood in the polycyclic conglomerate, which represents a high-energy depositional system, as well as the absence of phloem and external cortex, indicates transport prior to deposition and thus allochthonous deposition. Moreover, the presence of well-defined grow rings suggests that *Itaquixylon heterogenum* probably grew in an environment with marked seasonality (see Schweingruber 1996). However, considering that only a

single fossil was discovered and studied, and the allochthonous condition of the fossil, we cannot infer meaningful palaeoclimatic patterns.

This fossil wood adds another fossil-taxon to the Fabaceae subfamily Mimosoideae, and supports previous records which demonstrated the presence of the family in the Pliocene – Pleistocene of Rio Grande do Sul State based on fossil wood (e.g. Bolzon 1999) and pollen (Behling et al. 2005).

Acknowledgements

The authors acknowledge Prof. Dr. Saul Milder (in memoriam) from the Universidade Federal de Santa Maria for support during field work, and Professor Dr. Robson Tadeu Bolzon, from the Universidade Federal do Paraná, for preliminary discussions regarding this study. The authors also acknowledge the suggestions given by Prof. Dr. Peter Gasson and anonymous Reviewer 2, which significantly improved the paper. J.R.W. Benicio acknowledges CAPES/PROSUP, for a doctor scholarship; E.F. Pires acknowledges CNPq (401845/2010-9); R. Spiekermann acknowledges CNPq (166622/2014-1); A. Jasper acknowledges CAPES (Brazil – 8107-14-9), CNPq (305436/2015-5; 444330/2014-3), Alexander von Humboldt Foundation (Germany BRA 1137359 STPCAPES) and FAPERGS. D. Uhl acknowledges financial support from CAPES (“Science without Borders Program” – A072/2013).

References

- Ab'Saber, A. N. (1969): Participação das superfícies aplainadas nas paisagens do Rio Grande do Sul [Influence of the plain surfaces in the landscapes of Rio Grande do Sul]. – *Geomorfologia*, 11: 1–11. (in Portuguese)
- APG III [Angiosperm Phylogeny Group III] (2009): An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants. – *Botanical Journal of the Linnean Society*, 16: 105–121.
- Baretta-Kuipers, T. (1981): Wood Anatomy of Leguminosae: it's relevance to taxonomy. – In: Polhill, R. M., Raven, P. H. (eds), *Advances in Legume Systematics*. Royal Botanic Gardens, Kew, pp. 677–705.
- Barros, C. F., Callado, C. H. (1997): Madeiras da Mata Atlântica: Anatomia do lenho de espécies ocorrentes nos remanescentes florestais do Estado do Rio de Janeiro – Brasil [Woods of the Atlantic Forest: Wood anatomy of species from forest remnants of the Rio de Janeiro State – Brazil]. – *Instituto de Pesquisas Jardim Botânico, Rio de Janeiro*, 93 pp. (in Portuguese)
- Behling, H., Pillar, V., Bauermann, S. (2005): Late Quaternary grassland (Campos), gallery forest, fire, and climate dynamics, studied by pollen, charcoal and multivariate analysis of the São Francisco de Assis core in Western Rio Grande do Sul (Southeastern Brazil). – *Review of Palaeobotany and Palynology*, 133: 235–248. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2004.10.004>
- Bolzon, R. T. (1997): Caules Silicificados de Angiospermas (Terciário) da Região de Uruguaiana, Rio Grande do Sul, Brasil [Silicified angiosperms stems (Tertiary) of the Uruguaiana region, Rio Grande do Sul, Brazil]. – *Revista Universidade de Guarulhos*, 2: 237–237. (in Portuguese)
- Bolzon, R. T. (1999): Lenhos de Dicotyledoneae do Cenozóico da Região de Uruguaiana, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil [Cenozoic Dicotyledoneae woods of the Region of Uruguaiana, Rio Grande do Sul State, Brazil]; PhD Thesis. – MS, University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 199 pp. (in Portuguese) (copy in the library of the University of Rio Grande do Sul)
- Bolzon, R. T., Marchiori, J. N. C. (2002): Lenhos fósseis de myrtaceae da região de Uruguaiana, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil [Fossil woods of Myrtaceae from the region of Uruguaiana, Rio Grande do Sul State, Brazil]. – *Acta Geológica Leopoldensia*, 25: 41–63. (in Portuguese)
- Bolzon, R. T., Marchiori, J. N. C., Alves, L. S. R., Guerra-Sommer, M. (1991): Madeira de Angiosperma Fóssil (Terciário) da Região de Uruguaiana, Rio Grande do Sul: Análise Preliminar [Fossil angiosperm wood from the Tertiary of Uruguaiana Region, Rio Grande do Sul: preliminary analysis]. – In: *Sociedade Brasileira de Paleontologia, Congresso Brasileiro de Paleontologia, Boletim de Resumos*, 12: 65–65. (in Portuguese)
- Bolzon, R. T., Oliveira, E. V. (2000): Associação de lenhos fósseis da região de Uruguaiana, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil: considerações sobre geologia e tafonomia [Fossil wood assemblage from the Uruguaiana region, Rio Grande do Sul State, Brazil: geological and taphonomical considerations]. – *Revista da Universidade de Guarulhos*, 5: 160–163. (in Portuguese)
- Bombin, M. (1975): Afinidade paleoecológica, cronológica e estratigráfica do componente de megamamíferos na biota do Quaternário terminal da Província de Buenos Aires, Uruguai e Rio Grande do Sul (Brasil) [Palaeoecology, chronology and stratigraphy affinity of a megamammals from the Quaternary of the Province of Buenos Aires, Uruguay and Rio Grande do Sul (Brazil)]. – *Comunicações do Museu de Ciências da PUCRS*, 9: 1–28. (in Portuguese)
- Bombin, M. (1976): Modelo Paleoecológico Evolutivo para o Neoquaternário da Região da Campanha-Oeste do Rio Grande do Sul (Brasil). A Formação Touro Passo, seu conteúdo Fossilífero e a Pedogênese pós-deposicional [Paleoecological evolution of the Neoquaternary of the west portion of the Campanha Region, Rio Grande do Sul (Brazil). The Fossiliferous content and the post-depositional pedogenesis of the Touro Passo Formation]. – *Comunicações do Museu de Ciências e Tecnologia da PUCRS*, 15: 1–90. (in Portuguese)
- Bombin, M., Klamt, E. (1976): Evidências paleoclimáticas em solos do Rio Grande do Sul [Paleoclimatic evidence on soils of Rio Grande do Sul]. – *Comunicações do Museu de Ciências e Tecnologia da PUCRS*, 13: 1–12. (in Portuguese)
- Brea, M. (1995): *Ulmium chubutense* n.sp. (Lauraceae), Leño Permineralizado del Terciário Inferior de Bahía Solano, Chubut, Argentina [*Ulmium chubutense* n. sp. (Lauraceae), a permineralized wood from the Lower Tertiary of Bahía Solano, Chubut, Argentina]. – *Ameghiniana*, 32: 19–30. (in Spanish)

- Brea, M., Aceñolaza, P., Zucol, A. (2001): Estudio paleo-xilológico en la Formación Paraná, Entre Ríos, Argentina [Anatomical study of fossil woods from the Paraná Formation, Entre Ríos, Argentina]. – In: XI Simposio Argentino de Paleobotánica y Palinología (September 12–14, 2000, San Miguel de Tucumán, Argentina). Publicación Especial, Asociación Paleontológica Argentina, 8: 7–17. (in Spanish)
- Brindley, G. W., Brown, G. (1980): Crystal Structures of Clay Minerals and their X-Ray Identification. – Mineral Society, London, 495 pp.
- Bromhead, E. F. (1838): An attempt to ascertain characters of the botanical alliances. – Edinburgh New Philosophical Journal, 25: 123–133.
- Burkart, A. (1952): Las leguminosas argentinas silvestres y cultivadas [The wild and cultivated Leguminosae from Argentine]. – Acme Agency, Buenos Aires, 569 pp. (in Spanish)
- Buurman, P. (1972): Mineralization of fossil wood. – Scripta Geologica, 12: 1–43.
- Candolle, A. P. D. (1825): Prodrômus systematis naturalis regni vegetabilis 2 [An essay of the natural system of the vegetable kingdom]. – Treuttel and Würtz, Paris, 644 pp. (in Latin)
- Carlquist, S. (2001): Comparative wood anatomy, systematic, ecological, and evolutionary aspects of dicotyledon wood. – Springer, Berlin, 448 pp.
- Carnieletto, C., Marchiori, J. N. C. (1993): Anatomia da madeira de *Mimosa eriocarpa* Benth. [Wood anatomy of *Mimosa eriocarpa* Benth.]. – Ciência Florestal, 3: 107–120. (in Portuguese)
- Cozzo, D. (1951): Anatomia del Leño Secundario de las Leguminosas Mimosoideas y Caesalpinoideas argentinas [Anatomy of the secondary xylem of the Argentinean Leguminosae and Caesalpinoideae]. – Ciencias Botánicas, 2: 63–146. (in Spanish)
- Da Rosa, A. A. S. (2009): Geologia do Quaternário Continental do RS: Estado da Arte e Perspectivas de Trabalho [The Geology of the continental Quaternary deposits of RS: state of the art and study perspectives]. – In: Ribeiro, A. M., Bauermamnn, S. G., Scherrer, C. S. (eds), Quaternário do Rio Grande do Sul: integrando conhecimentos [Quaternary of Rio Grande do Sul: integrating knowledge]. Monografias, Sociedade Brasileira de Paleontologia, 1: 17–34. (in Portuguese)
- Dias-Leme, C. L., Cartwright, C., Gasson, P. (2010): Anatomical changes to the wood of *Mimosa ophthalmocentra* and *Mimosa tenuiflora* when charred at different temperatures. – IAWA Journal, 31: 335–351.
<https://doi.org/10.1163/22941932-90000027>
- Elias, T. S. (1981): Mimosoideae. – In: Polhill, R. M., Raven, P. H. (eds), Advances in Legume Systematics. Royal Botanic Gardens, Kew, pp. 143–152.
- Erthal, F., Kotzian, C. B., Simões, M. G. (2015): Multistep taphonomic alterations in fluvial mollusc shells: a case study in the Touro Passo Formation (Pleistocene–Holocene), Southern Brazil. – Palaios, 30: 388–402.
<https://doi.org/10.2110/palo.2013.104>
- Evans, J. A., Gasson, P. E., Lewis, G. P. (2006): Wood Anatomy of the Mimosoideae (Leguminosae). – IAWA Journal Supplement 5: 1–117.
- Franco, J. M., Brea, M. (2010): *Microlobiusxylon paranaensis* gen. et sp. nov. (Fabaceae, Mimosoideae) from the Pliocene-Pleistocene of Ituzaingó Formation, Paraná Basin, Argentina. – Revista Brasileira Paleontologia, 13: 103–114.
<https://doi.org/10.4072/rbp.2010.2.03>
- Franco, M. J., Brea, M. (2013): Leños fósiles de leguminosas de la Formación Ituzaingó, Entre Ríos, Argentina: Implicancias paleoecológicas paleobiogeográficas [Fossil woods of Leguminosae from Ituzaingó Formation, Entre Ríos, Argentina: palaeoecological and paleogeographic implications]. – Ameghiniana, 50(2): 167–191. (in Spanish)
<https://doi.org/10.5710/AMGH.6.01.2013.599>
- Giraud, B., Lejal-Nicol, A. (1989): *Cassinium dongolense* n. sp. bois fossile de Caesalpiniaceae du Nubien du Soudan septentrional. – Review of Palaeobotany and Palynology, 59(1-4): 37–50.
[https://doi.org/10.1016/0034-6667\(89\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0034-6667(89)90004-3)
- Gonzalez, I. (1981): Mineralogia de Troncos Fosiles de las Areas Fosilíferas de “Pichasca”, y “El Espino” y “Teguaco”, Chile [Mineralogy of fossil woods from the fossiliferous areas of “Pichasca”, “El Espino” and “Teguaco”, Chile]. – In: Sanguinetti, Y. T. (ed.), Anais do 2. Congresso Latino-Americano de Paleontologia, 2nd vol. Editore Pallotti, Porto Alegre, pp. 429–448. (in Spanish)
- Gros, J. P. (1992): A Synopsis of the Fossil Record of Mimosoid Legume Wood. – In: Herendeen, P. S., Dilcher, D. I. (eds), Advances in Legume Systematics: The Fossil Record. Royal Botanic Gardens, Kew, pp. 69–83.
[https://doi.org/10.1016/S0016-6995\(06\)80208-1](https://doi.org/10.1016/S0016-6995(06)80208-1)
- Gros, J. P. (1994): Historique des taxons de bois fossiles de Mimosaceae. – Geobios, 27: 3–21.
- Hsiou, A. S. (2007): A new Teiidae species (Squamata, Scincomorpha) from the late Pleistocene of Rio Grande do Sul State, Brazil. – Revista Brasileira de Paleontologia, 10: 181–194.
<https://doi.org/10.4072/rbp.2007.3.05>
- IAWA Committee (1989): List of Microscopic features for Hardwood Identification. – IAWA Bulletin, 10: 218–358.
- Jobson, R. W., Luckow, M. (2007): Phylogenetic study of genus *Piptadenia* (Mimosoideae) using plastic trnL-F and trnK/matK sequence data. – Systematic Botany, 32: 569–575.
<https://doi.org/10.1600/036364407782250544>
- Judd, W. S., Campbell, C. S., Kellogg, E. A., Stevens, P. F., Donoghue, M. J. (2007): Plant systematics: a phylogenetic approach, 3rd edition. – Sinauer Associates Inc., Sunderland, 565 pp.
- Kerber, L., Oliveira, E. V. (2007): Mamíferos fósiles y aspectos paleoambientales de la localidad Barranca Grande, Formación Touro Passo, oeste de Rio Grande do Sul, Brasil [Fossil Mammals and palaeoenvironmental aspects of the Barranca Grande locality, Touro Passo Formation, West of Rio Grande do Sul, Brazil]. – In: Jornadas Argentinas de Mastozoología [Argentine Conference of Mastozoology], Libro de resúmenes, 21: 237–238. (in Spanish)
<https://doi.org/10.4013/gaea.20082.02>
- Kerber, L., Oliveira, E. V. (2008): Fósseis de vertebrados da Formação Touro Passo (Pleistoceno Superior), Rio Grande do Sul, Brasil: atualização dos dados e novas

- contribuições [Fossil vertebrates of the Touro Passo Formation (Upper Pleistocene), Rio Grande do Sul, Brazil: data update and new contributions]. – *Gaea* 4: 49–64. (in Portuguese)
<https://doi.org/10.4013/gaea.20082.02>
- Kloster, A., Gnaedinger, S., Adami-Rodrigues, K., Urban, C. (2015): New record of Fabaceae fossil woods from the Solimões Formation (Miocene), Acre Basin, Amazon, Brazil. – *Revista Brasileira de Paleontologia*, 18(3): 391–402.
<https://doi.org/10.4072/rbp.2015.3.05>
- Kotzian, C. B., Simões, M. G. (2006): Taphonomy of recent freshwater molluscan death assemblages, Touro Passo stream, southern Brazil. – *Revista Brasileira de Paleontologia*, 9: 243–260.
<https://doi.org/10.4072/rbp.2006.2.08>
- Kräusel, R. (1925): Beiträge zur Kenntnis der fossilen Flora Südamerikas. I. Fossile Hölzer aus Patagonien und benachbarten Gebieten. – *Arkiv för Botanik*, 19: 1–36.
- Lisboa, N. A. (1990): Aspectos morfoestruturais e geomorfológicos do extremo sul-ocidental do Planalto Meridional, Quaraí, RS [Geomorphological and Morphostructural aspects of the South-Western portion of the Southern Plateau, Quaraí, RS]. – *Ciência e Natura*, 12: 105–109. (in Portuguese)
- Lisboa, N. A., Schuck, M. T. G. O. (1990): Identificação e estudo geomorfológico da Superfície de Aplainamento do Cerro da Lagoa, (Santana da Boa Vista) RS, através de técnicas de sensoriamento remoto [Identification of the plain surface geomorphology of the Cerro da Lagoa, (Santana da Boa Vista) RS, by the use of remote sensing techniques]. – *Geociências*, 9: 189–199. (in Portuguese)
- Lewis, G. P., Schrire, B., Mackinder, B., Lock, M. (2005): *Legumes of the World*. – Royal Botanic Gardens, Kew, 592 pp.
- Luckow, M., Miller, J. T., Murphy, D. J., Livshultz, T. (2003): A phylogenetic analysis of the Mimosoideae (Leguminosae) based on chloroplast DNA sequence data. – In: Klitgaard, B. B., Bruneau, A. (eds), *Advances in legume systematics: Higher Level Systematics*. Royal Botanic Gardens, Kew, pp. 197–220.
- Lutz, A. I. (1979): Maderas de Angiospermas (Anacardiaceae y Leguminosae) del Plioceno de la Provincia de Entre Ríos, Argentina [Angiosperms woods (Anacardiaceae and Leguminosae) from Pliocene of the Entre Ríos Province, Argentina]. – *FACENA*, 3: 39–63. (in Spanish)
- Lindley, J. (1836): *The Genera and Species of Orchidaceous plants*. – Ridgways, Piccadilly, London, 553 pp.
- Maccari, A., Marchiori, J. N. C. (1994): Estudo anatômico do xilema secundário de *Mimosa sparsa* Benth. [Anatomical study of the secondary xylem of *Mimosa sparsa* Benth.]. – *Ciência Florestal*, 4: 145–155. (in Portuguese)
- Machado, P. F. S., Marchiori, J. N. C. (2016): Anatomia do lenho de duas espécies sul-brasileiras do gênero *Mimosa* L. e subserie *Obstrigosae* (Benth.) [Wood anatomy of two South Brazilian species of the genus *Mimosa* L. and subseries *Obstrigosae* (Benth.)]. – *Balduinia*, 52: 22–29. (in Portuguese)
<https://doi.org/10.5902/2358198022373>
- McNeill, J., Barrie, F. R., Buck, W. R., Demoulin, V., Greuter, W., Hawksworth, D. L., Herendeen, P. S., Knapp, S., Marhold, S., Marhold, K., Prado, J., Prud'homme van Reine, W. F., Smith, G. F., Wiersema, J. H., Turland, N. J. (2012): *International Code of Nomenclature for Algae, Fungi, and Plants (Melbourne Code)*. – *Regnum Vegetabile*, 154: 1–208.
- Marchiori, J. N. C. (1980): Estudos Anatômicos do Xilema secundário e da Casca de algumas Espécies dos Gêneros *Acacia* e *Mimosa*, Nativas no Estado do Rio Grande do Sul [Anatomical studies of the secondary xylem and bark of some species of the genus *Acacia* and *Mimosa*, in the Rio Grande do Sul State]; Master Thesis. – MS, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brazil, 186 pp. (in Portuguese) (copy in the library of Universidade Federal de Santa Maria)
- Marchiori, J. N. C. (1982): A estrutura do xilema secundário de *Mimosa daleoides* Benth. (Leguminosae Mimosoideae) [The secondary xylem of *Mimosa daleoides* Benth. (Leguminosae Mimosoideae)]. – *Ciência e Natura*, 4: 107–113. (in Portuguese)
- Marchiori, J. N. C. (1985): Anatomia das madeiras de *Mimosa cruenta* Benth. (Leguminosae Mimosoideae) [Wood anatomy of *Mimosa cruenta* Benth. (Leguminosae Mimosoideae)]. – *Ciências e Natura*, 7: 73–81. (in Portuguese)
- Marchiori, J. N. C. (1993): Anatomia da madeira e casca do maricá, *Mimosa bimucronata* (DC.) O. Ktze. [Bark and wood anatomy of maricá, *Mimosa bimucronata* (DC.) O. Ktze.]. – *Ciência Florestal*, 3: 85–106. (in Portuguese)
- Marchiori, J. N. C. (1996a): Anatomia do xilema secundário de *Mimosa incana* (Spreng.) Benth. [Anatomy of the secondary xylem of *Mimosa incana* (Spreng.) Benth.]. – *Ciência Florestal*, 6: 53–63. (in Portuguese)
- Marchiori, J. N. C. (1996b): Anatomia do xilema secundário de *Mimosa berroi* Burk [Anatomy of the secondary xylem of *Mimosa berroi* Burk.]. – *Ciência e Natura*, 18: 117–129. (in Portuguese)
- Marchiori, J. N. C. (1996c): Anatomia do xilema secundário de *Mimosa uruguensis* Hook. et Arn. [Anatomy of the secondary xylem of *Mimosa uruguensis* Hook. et Arn.]. – *Ciência e Natura*, 18: 103–115. (in Portuguese)
- Marchiori, J. N. C., Muñiz, G. I. B. (1997a): Estudo anatômico do xilema secundário de *Mimosa trachycarpa* Benth. [Anatomical study of the secondary xylem of *Mimosa trachycarpa* Benth.]. – *Ciência Rural*, 27(2): 223–228. (in Portuguese)
- Marchiori, J. N. C., Muñiz, G. I. B. (1997b): Estudo anatômico do xilema secundário de *Mimosa pilulifera* Benth. [Anatomical study of the secondary xylem of *Mimosa pilulifera* Benth.]. – *Ciência Florestal*, 7(1): 65–75. (in Portuguese)
<https://doi.org/10.1590/S0103-84781997000200009>
- Martínez, L. C. (2010): *Prosopisinoxylon anciborae* nov. gen. et sp. (Leguminosae, Mimosoideae) from the Late Miocene Chiquimil Formation (Santa Maria Group), Catamarca, Argentina. – *Review of Palaeobotany and Palynology*, 158(3): 262–271.
<https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2009.09.006>
- Metcalf, C. R., Chalk, L. (1950): *Anatomy of the Dicotyledons*. – Clarendon Press, Oxford, 806 pp.
- Milder, S. E. S. (2000): Arqueologia do sudoeste do Rio Grande do Sul: uma perspectiva geológica [Archeology

- of the southwestern Rio Grande do Sul: a geological perspective]; PhD Thesis. – MS, Museu de Arqueologia e Etnologia, Universidade de São Paulo, Brazil, 172 pp. (in Portuguese) (copy in the library of the Universidade de São Paulo, Brazil).
- Mirioni, H. (1965): Etude Anatomique de Quelques Bois Tertiaires de Colombie. – *Boletim de Geologia*, 20: 20–59.
- Moya, E., Brea, M. (2015): Legume Fossil Woods from the Arroyo Feliciano Formation (Late Pleistocene, North-eastern Argentina): Paleobiogeographic Implications. – *Ameghiniana*, 52(5): 558–573.
<https://doi.org/10.5710/AMGH.24.06.2015.2875>
- Müller-Stoll, W., Mädel, E. (1967): Die fossilen Leguminosen-Hölzer. Eine Revision der mit Leguminosen verglichenen fossilen Hölzer und Beschreibungen älterer und neuer Arten. – *Palaeontographica*, B, 119: 95–174.
- Mussa, D. (1958): Dicotiledônea fóssil da Formação Barreiras, Estado de Sergipe [Fossil Dicotyledon of the Barreiras Formation, Sergipe State]. – *Boletim do Departamento Nacional de Produção Mineral*, 181: 1–22. (in Portuguese)
- Mussa, D. (1959): Contribuição à Paleoanatomia Vegetal: II Madeiras Fósseis de Território do Acre (Alto Juruá) Brasil [Contribution to fossil plant anatomy: II Fossil Woods of the territory of Acre (Alto Juruá), Brazil]. – *Boletim do Departamento Nacional de Produção Mineral*, 195: 1–54. (in Portuguese)
- Mussa, D., Coimbra, A. M. (1984): Método de Estudo Tafonômico Aplicado a Lignispécimes Permianos da Bacia do Paraná [Taphonomic method applied to Permian fossil woods of the Paraná Basin]. – *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 56: 85–101. (in Portuguese)
- Nikitin, A. A. (1935): Novaya drevesina iz verkhnego pliotse na vostochnoy Gruzii [A new wood from the Upper Pliocene of eastern Georgia]. – *Trudy Neftyanogo Nauchno-Issledovatel'skogo Geologorazvedochnogo Instituta*, 51: 51–52. (in Russian)
- Nishida, M., Ohsawa, T., Nishida, H. (1990): Anatomy and Affinities of the Petrified Plants from the Tertiary of Chile. – *Botanical Magazine*, 103: 255–268.
<https://doi.org/10.1007/BF02488638>
- Oliveira, E. V., Kerber, L. (2009): Paleontologia e aspectos geológicos das sucessões do final do Neógeno no sudoeste do Rio Grande do Sul, Brasil [Palaeontological and geological aspects of the Late Neogene deposits in southwestern Rio Grande do Sul, Brazil]. – *Gaea*, 5: 21–34. (in Portuguese)
<https://doi.org/10.4013/gaea.2009.51.03>
- Oliveira, E. V., Lavina, E. L. (2000): Mamíferos: protagonistas dos tempos modernos [Mammals: protagonists of modern times]. – In: Holz, M., De Ros, L. F. (eds), *Paleontologia do Rio Grande do Sul. Centro de investigações do Gondwana UFRGS, Porto Alegre*, pp. 376–397. (in Portuguese)
- Oliveira, E. V., Milder, S. E. S. (1990): Considerações preliminares sobre uma nova fauna de moluscos fósseis da Formação Touro Passo (Pleistoceno superior – Holoceno) [Preliminary considerations of a new mollusc fossil fauna from the Touro Passo Formation (Pleistocene – Holocene)]. – *Veritas*, 35: 121–129. (in Portuguese)
- Paula, J. E. (1995): Anatomia e dendrometria de *Mimosa artemisiana* e *Eucalyptus grandis* [Anatomy and dendrometry of *Mimosa artemisiana* and *Eucalyptus grandis*]. – *Pesquisa agropecuária brasileira*, 30(6): 745–757. (in Portuguese)
- Pires, E. F., Da Rosa, A. A. S. (2000): Sobre um Lenho Fóssil de Itaqui, Extremo Oeste do Rio Grande do Sul [Considerations of a fossil wood from Itaqui, West of Rio Grande do Sul]. – *Revista Universidade Guarulhos de Geociências*, 5: 137–140. (in Portuguese)
- Pereira, A. C. S., Siegloch, A. M., Marchiori, J. N. C. (2013): Anatomia do lenho de *Mimosa micropteris* Benth. [Wood anatomy of *Mimosa micropteris* Benth.]. – *Balduinia*, 40: 18–22. (in Portuguese)
- Pereira, A. C. S., Siegloch, A. M., Marchiori, J. N. C. (2014): Anatomia do lenho de *Mimosa flocculosa* Burkart [Wood anatomy of *Mimosa flocculosa* Burkart]. – *Balduinia*, 43: 29–33. (in Portuguese)
- Polhill, R. M., Raven, P. H., Stirton, C. H. (1981): Evolution and Systematics of the Leguminosae. – In: Polhill, R. M., Raven, P. H. (eds), *Advances in Legume Systematics*. Royal Botanic Gardens, Kew, pp. 1–26.
- Pons, D. (1969): A Propos d'une Goupiaçee du Tertiaire de Colombie: *Goupioxylon stutzeri* Schönfeld. – *Palaeontographica*, B, 128: 65–80.
- Prakash, U. (1975): Fossil woods from the Lower Siwalik beds of Himachal Pradesh, India. – *Palaeobotanist*, 22: 192–210.
- Prakash, U., Tripathi, P. P. (1968): Fossil woods of *Adenanthera* and *Swintonia* from the Tertiary of Assam. – *Current Science*, 37: 115–116.
- Pujana, R. R., Martinez, C. A., Brea, M. (2011): El registro de madera fósiles de Leguminosae de Sudamérica [The fossil record of Leguminosae in South America]. – *Revista do Museu argentino de Ciências Naturales*, 13(2): 183–194. (in Spanish)
- Ribeiro, A. M., Scherer, C., Pitana, V. G. (2009): Mamíferos do Pleistoceno do Rio Grande do Sul, Brasil: estado atual do conhecimento [Pleistocene mammals of the Rio Grande do Sul, Brazil: current knowledge]. – In: Ribeiro, A. M., Bauermann, S. G., Scherer, C. S. (eds), *Quaternário do Rio Grande do Sul: Integrando Conhecimentos* [Quaternary of Rio Grande do Sul: integrating knowledge]. Monografias da Sociedade Brasileira de Paleontologia, 1: 25–27. (in Portuguese)
- Richter, H. G., Charvet, L. M. (1973): Estudo e pesquisa sobre *Mimosa scabrella* [Study and research of *Mimosa scabrella*]. – *Floresta*, 4: 68–69. (in Portuguese)
- Salard, M. (1961): *Euphorbioxylon bridelioides* n. sp. Bois Fossile du Pérou. – *Comptes rendus du Congrès National des Sociétés savantes*, 86: 581–591.
- Salard, M. (1963): Sur un Bois Tertiaire du Pérou. – *Comptes rendus du Congrès National des Sociétés savantes*, 88: 581–591.
- Schenk, A. (1883): Fossile Hölzer. – In: Zittel, K. (ed.), *Beiträge zur Geologie und Paläontologie der Lybischen Wüste. II. Paläontologische Teil*. *Palaeontographica*, 30: 1–20.
- Scherer, C. S., Da Rosa, A. A. S. (2003): Um equídeo fóssil do Pleistoceno de Alegrete, RS, Brasil [A fossil equine from the Pleistocene of Alegrete, RS, Brazil]. – *Pesquisas em Geociências*, 3: 33–38. (in Portuguese)

- Schönfeld, E. (1947): Hölzer aus dem Tertiär von Kolumbien. – Abhandlungen der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft, 475: 1–53.
- Schopf, J. M. (1975): Modes of fossil preservation. – Review of Palaeobotany and Palynology, 20(1-2): 27–53. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(75\)90005-6](https://doi.org/10.1016/0034-6667(75)90005-6)
- Silva, L. B., Santos, F. A. R., Gasson, P., Cutler, D. (2011): Estudo comparativo da madeira de *Mimosa ophthalmocentra* Mart. ex Benth. e *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. (Fabaceae – Mimosoideae) na caatinga nordestina [Comparative study of the wood of *Mimosa ophthalmocentra* Mart. ex Benth. and *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. (Fabaceae – Mimosoideae) in the northeastern caatinga]. – Acta Botanica Brasilica, 25(2): 301–314. (in Portuguese) <https://doi.org/10.1590/S0102-33062011000200006>
- Silva-Curvello, W. (1935): Sobre um Vegetal do Linhito de Fonseca, Minas Gerais [About a plant from Fonseca Lignite, Minas Gerais]. – Anais da Academia Brasileira de Ciências, 27: 293–296. (in Portuguese)
- Suguio, K. (1971): Estudo dos troncos de Árvores “Linhificados” dos Aluviões Antigos do Rio Pinheiros (São Paulo): Significados Geocronológico e Possivelmente Paleoclimático [Fossil woods from the ancient alluviums of the Pinheiros River (São Paulo): Geochronological and Paleoclimatic significance]. – In: Congresso Brasileiro de Geologia, Boletim de resumo, 25: 63–69. (in Portuguese)
- Suguio, K., Mussa, D. (1978): Madeiras Fósseis dos Aluviões Antigos do Rio Tietê, São Paulo [Fossils woods of the ancient alluviums of the Tietê River, São Paulo]. – Boletim do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 9: 25–45. (in Portuguese)
- Schweingruber, F. H. (1996): Tree rings and environment dendroecology. – Ed. Paul Haupt, Berne, 609 pp.
- Tomasi, J. C., Denardi, L., Trevisan, R., Tramontina, J., Baldin, T. (2015): Descrição Anatômica do Xilema Secundário de *Mimosa ramulosa* Benth. (Fabaceae) [Anatomical description of the secondary xylem of *Mimosa ramulosa* Benth. (Fabaceae)]. – Enciclopédia Biosfera, 21: 727–736. (in Portuguese)
- Thorne, R. F. (1992): Classification and Geography of the Flowering plants. – Botanical Review, 58: 225–348. <https://doi.org/10.1007/BF02858611>
- Tonni, E. P., Huarte, R. A., Carbonari, J. E., Figini, A. J. (2003): New radiocarbon chronology for the Guerrero Member of the Luján Formation (Buenos Aires, Argentina): palaeoclimatic significance. – Quaternary International, 109: 45–48. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(02\)00201-X](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00201-X)
- Torres, T., Rallo, M. (1981): Anatomia de Troncos Fosiles del Cretacico Superior de Pichasca en El Norte de Chile [Anatomy of fossil woods from the Upper Cretaceous of Pichasca, Northern Chile]. – In: Sanguinetti, Y. T. (ed.), Anais do 2. Congresso Latino-Americano de Paleontologia, 2nd vol. Editore Pallotti, Porto Alegre, pp. 385–398. (in Spanish)
- Tortorelli, L. A. (1956): Madeiras y Bosques Argentinos [Woods and forests from Argentina]. – Acme, Buenos Aires, 94 pp. (in Spanish)
- Wheeler, E., Baas, P. (1992): Fossil Wood of the Leguminosae. A Case Study in Xylem Evolution and Ecological Anatomy. – In: Herendeen, P. S., Dilcher, D. I. (eds), Advances in Legume Systematics. Royal Botanic Garden, Kew, pp. 281–301.

Explanations of the plates

PLATE 1

Wood anatomical details of *Itaquixylon heterogenum* gen. nov. et sp. nov.

Cross sections

1. Small core with fractures incrustated by quartz; distinct growth rings and diffuse porosity.
2. Solitary to multiple vessels, some of them with tyloses (arrow indicates twin vessel).
3. Detail of vessels with scanty paratracheal and vasicentric axial parenchyma (arrow).

Tangential section

4. Small alternate vested intervessel pits.
5. Detail of the alternate vested intervessel pits, with lenticular aperture (arrow).

Cross section

6. Presence of tyloses (arrow).

PLATE 2

Wood anatomical details of *Itaquixylon heterogenum* gen. nov. et sp. nov.

Tangential sections

1. Uniseriate (low and narrow rays) and biseriate rays (arrow).
2. Rectangular axial parenchyma cells directly adjacent to a vessel (arrow).
3. Detail of rays.

Radial sections

4. Heterocellular ray with one or two rows of square/upright marginal cells.
5. Detail of the heterocellular ray showing prismatic crystals (arrow).
6. Detail of prismatic crystal in the marginal square ray cells (arrow).

PLATE 1

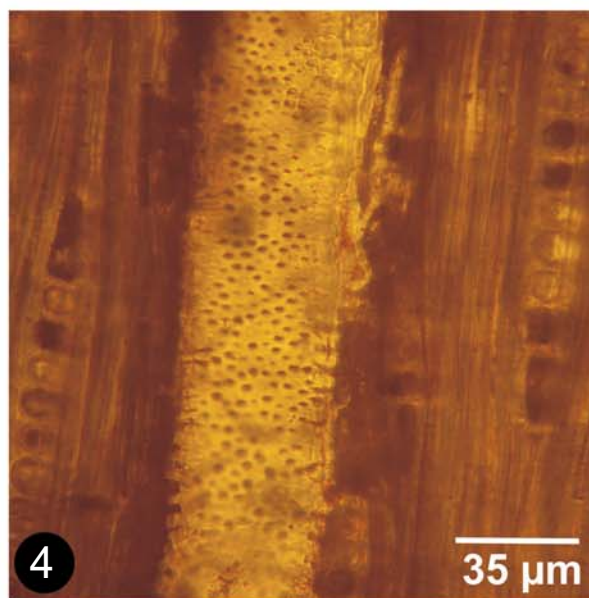
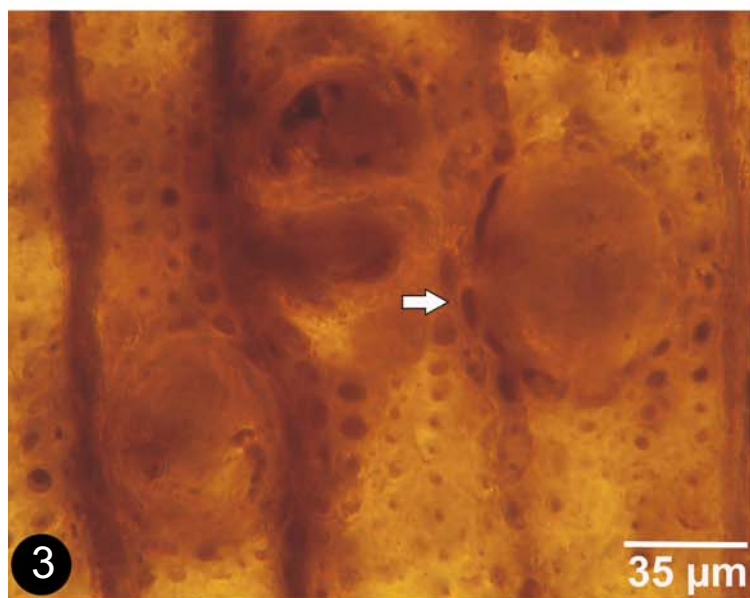
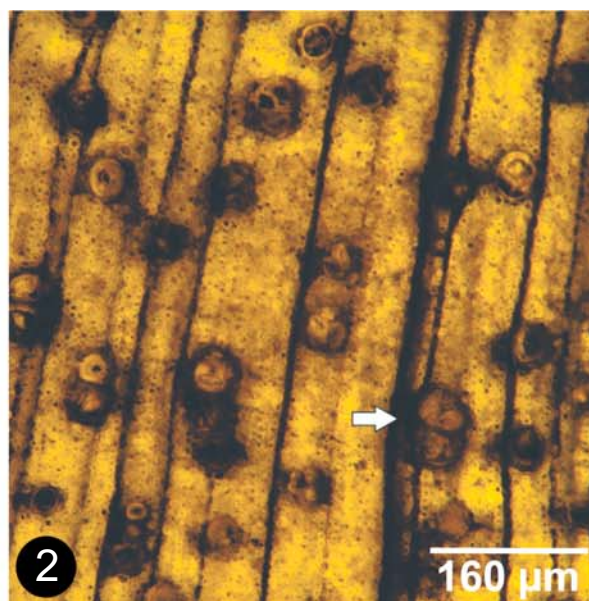
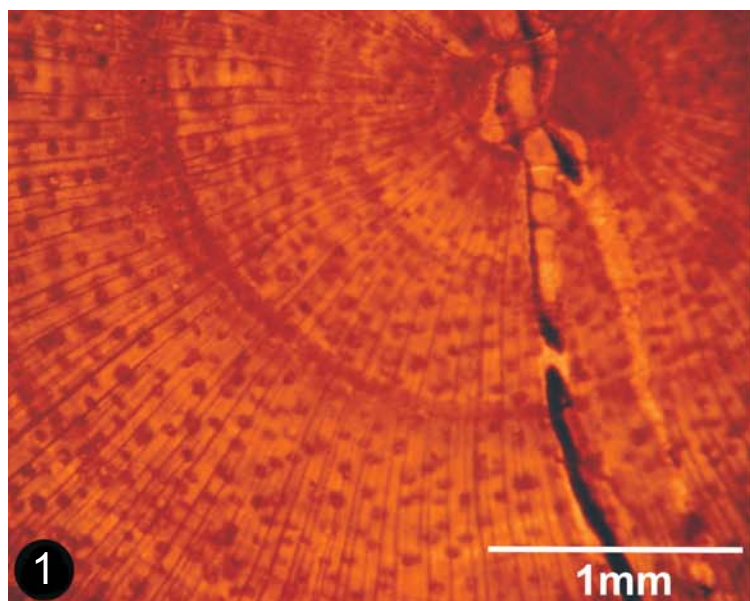
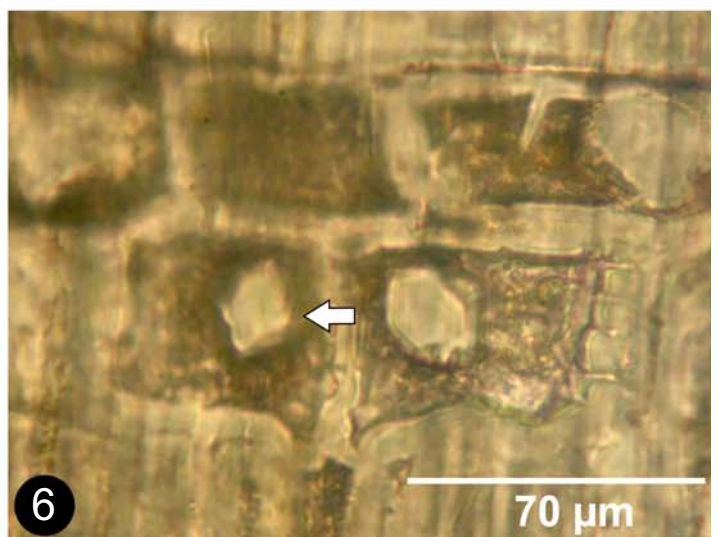
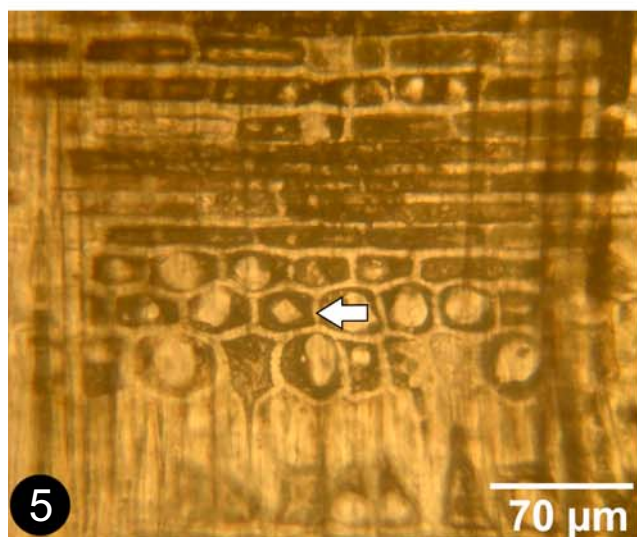
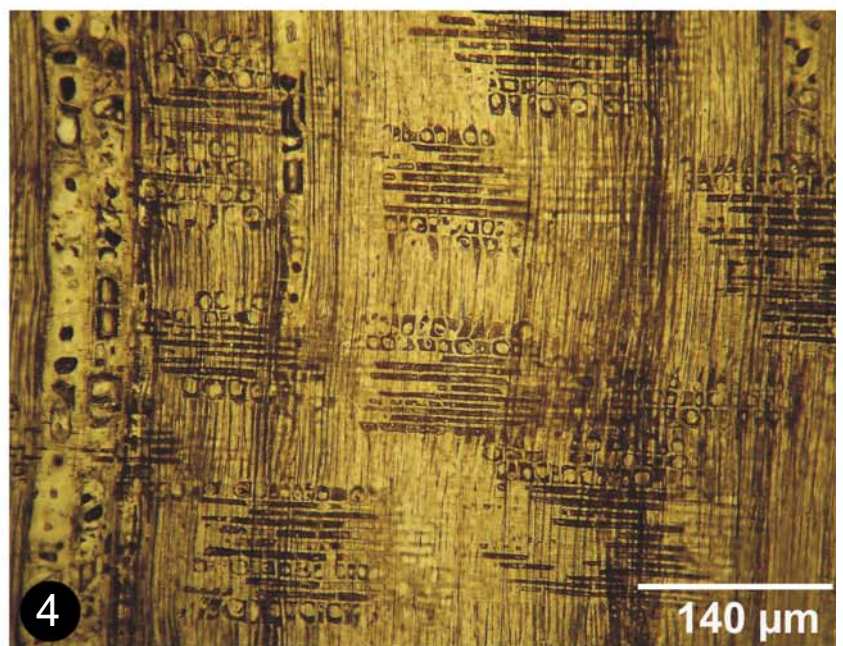
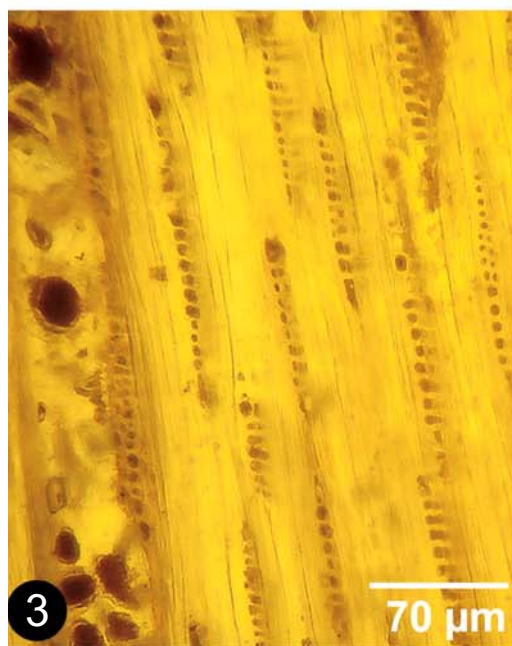
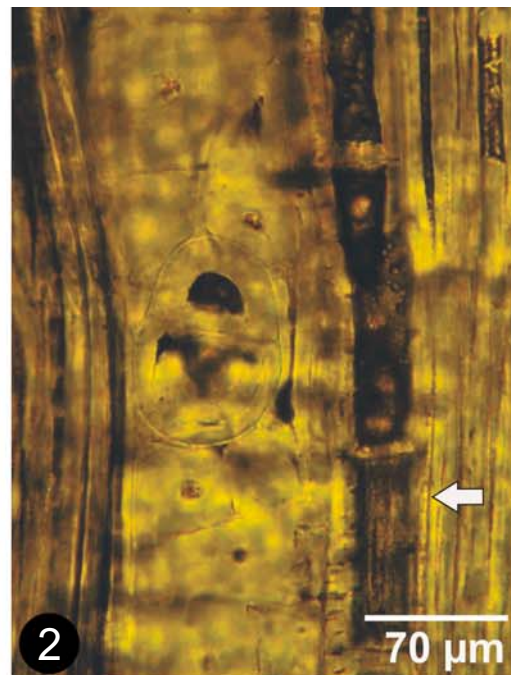
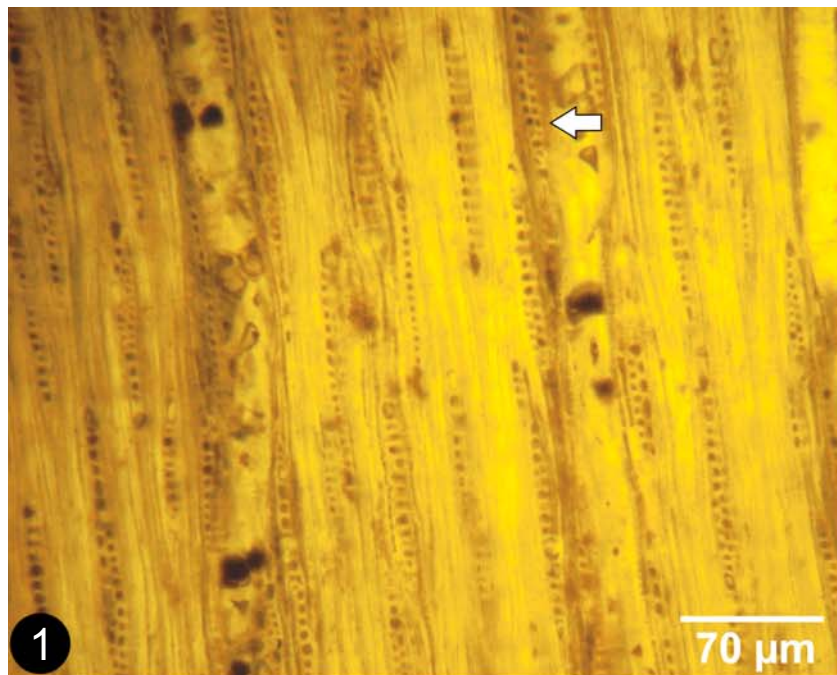
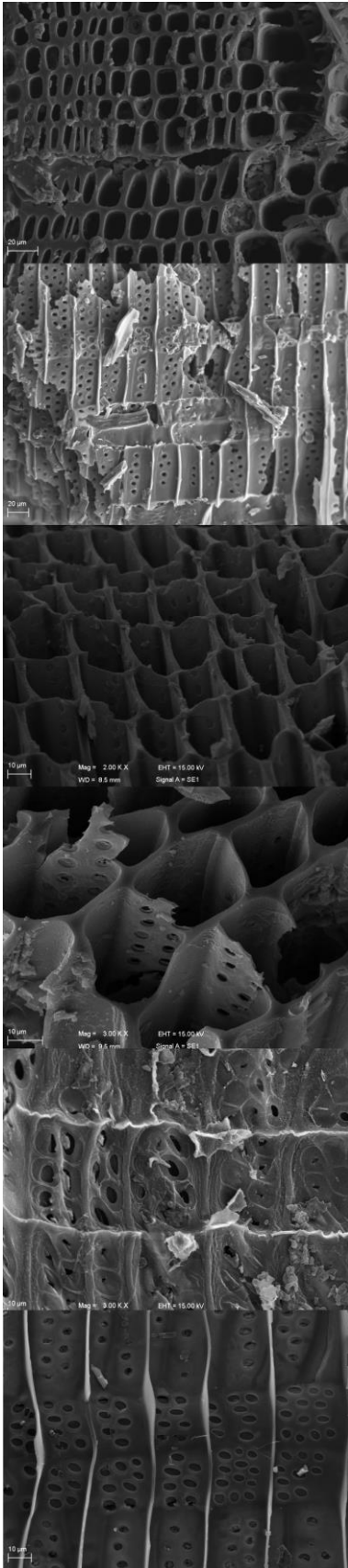


PLATE 2





Recurrent palaeo-wildfires in a Cisuralian coal seam: A palaeobotanical view on high-inertinite coals from the Lower Permian of the Paraná Basin, Brazil

RESEARCH ARTICLE

Recurrent palaeo-wildfires in a Cisuralian coal seam: A palaeobotanical view on high-inertinite coals from the Lower Permian of the Paraná Basin, Brazil

José Rafael W. Benicio^{1,2}, André Jasper^{1,2,3*}, Rafael Spiekermann², Luciane Garavaglia⁴, Etienne Fabbri Pires-Oliveira⁵, Neli Teresinha Galarce Machado¹, Dieter Uhl^{1,2,3}

1 Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento (PPGAD), Universidade do Vale do Taquari–Univates, Lajeado, Rio Grande do Sul, Brazil, **2** Laboratório de Paleobotânica e Evolução de Biomas do Museu de Ciências Naturais da Univates (LPEB/MCN/Univates), Lajeado, Rio Grande do Sul, Brazil, **3** Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum, Frankfurt am Main, Germany, **4** Centro Tecnológico de Carvão Limpo, SACT, Criciúma, Santa Catarina, Brazil, **5** Laboratório de Paleobiologia, Universidade Federal do Tocantins, Porto Nacional, Tocantins, Brazil

* ajasper@univates.br



OPEN ACCESS

Citation: Benicio JRW, Jasper A, Spiekermann R, Garavaglia L, Pires-Oliveira EF, Machado NTG, et al. (2019) Recurrent palaeo-wildfires in a Cisuralian coal seam: A palaeobotanical view on high-inertinite coals from the Lower Permian of the Paraná Basin, Brazil. PLoS ONE 14(3): e0213854. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213854>

Editor: Aisha Al Suwaidi, Khalifa University of Science and Technology, UNITED ARAB EMIRATES

Received: December 27, 2018

Accepted: March 3, 2019

Published: March 14, 2019

Copyright: © 2019 Benicio et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Data Availability Statement: All relevant data are within the manuscript and its Supporting Information files.

Funding: This study was supported by the Centro Tecnológico SATC during field-work and access to the study area. JRW Benicio acknowledges CAPES/PROSUC for doctoral fellowship; A Jasper acknowledges CAPES (Brazil – 8107-14-9), CNPq

Abstract

Distribution and abundance of charcoal in coal seams (in form of pyrogenic macerals of the inertinites group) have been considered as a reliable tool to interpret the local and regional palaeo-wildfire regimes in peat-forming depositional environments. Although the occurrence of inertinites is globally well documented for the Late Palaeozoic, the description of palaeobotanical evidence concerning the source plants of such charcoal is so far largely missing. In the present study, we provide the first detailed analysis of macro-charcoal preserved in the Barro Branco coal seam, Rio Bonito Formation, Cisuralian of the Paraná Basin, Santa Catarina State, Brazil. Charcoal, in form of macro-charcoal and inertinites, was documented in all the six coal-bearing strata that compose the succession, confirming the occurrence of recurrent palaeo-wildfires during its deposition. Reflectance values indicated a mean charring temperature reaching ~515°C (and up to 1,045°C in excess) and the macro-charcoal exhibits anatomical features of secondary xylem of *Agathoxylon*. Combination of results derived from palaeobotanical and petrological data demonstrates that gymnosperm-dominated vegetation was repeatedly submitted to fire events and reinforced the hypothesis that Gondwanan mires were high-fire systems during the Cisuralian.

Introduction

The distribution and abundance of fossil charcoal in coal seams, which is well documented for the Late Palaeozoic in form of pyrogenic inertinites [1], is a reliable tool to understand palaeo-wildfire events and interpret certain palaeoenvironmental conditions of the original peat-forming systems [2, 3]. However, compared to coal petrological studies on inertinites, studies on palaeo-wildfire records based on palaeobotanical evidence (like anatomical analysis of

(Brazil—444330/2014-3; 305436/2015-5) and Alexander von Humboldt Foundation (Germany).

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

charcoal) are still scarce for Gondwana, where entire Permian lithostratigraphic units have not been examined so far [1, 4, 5, 6].

For the Paraná Basin in Brazil, known macro-charcoal occurrences are mostly restricted to the southernmost levels of the Triunfo Member, a basal package of the Early Permian Rio Bonito Formation [4, 7, 8]. Except for some reports for the Bonito coal seam [4, 9], so far, the younger Paraguaçu and Siderópolis Members of the Rio Bonito Formation have not been studied in detail to examine the presence of macro-charcoal remains.

In the present study, we provide the first detailed description of macro-charcoal from the Barro Branco coal seam, Siderópolis Member of the Rio Bonito Formation. Besides providing anatomical descriptions and interpreting taxonomical affinities, we compared the presence of macro-charcoal remains to coal maceral contents in each studied carbonaceous level, aiming to demonstrate the importance of combining methods for a reliable reconstruction of palaeo-wildfire occurrences in peat-forming vegetation through the Late Palaeozoic in Gondwana.

Geological context

The Paraná Basin (Fig 1A) is an extensive intracratonic sedimentary basin covering ~1,700,000 km², of the central portion of South America. The basin floor subsidence, associated with Palaeozoic and Mesozoic sea-level variations, generated six second-order super sequences deposited from the Ordovician to the Late Cretaceous. The major Palaeozoic transgressive-regressive cycles are exposed in the Rio Ivaí (Ordovician-Silurian), Paraná (Devonian), and Gondwana I (Carboniferous-Early Triassic) supersequences, including the Cisuralian coal-bearing strata of the Rio Bonito Formation [10, 11].

The Rio Bonito Formation has been formally divided into three lithostratigraphic members, named from the base to the top as Triunfo Member, Paraguaçu Member and Siderópolis Member [12]. The Triunfo Member is composed of coastal and fluvial sandstones as well as coal deposits, the Paraguaçu Member comprises mudstones, coal deposits and fine-grained marine sandstones, and the Siderópolis Member consists of coastal and fluvial sandstones and coal deposits [12, 13].

At the south-eastern part of the distributional area of the Rio Bonito Formation, the Siderópolis Member contains the thickest coal seams, which are informally named, from the base to the top, as Bonito, Ponte Alta (A and B), Irapuá, Barro Branco and Treviso coal seams [14, 15] (Fig 2A). These were formed in an estuarine-barrier shore-face depositional context, and peat accumulation occurred during high stand system tract (Bonito), low stand system tract (Ponte Alta A and B) and transgressive system tract (Irapuá, Barro Branco and Treviso) [15].

The Barro Branco coal seam is composed of a coal layer (informally named as *Banco*) at the base, siltstones and sandstones, interbedded with thin coal layers (informally named as *Coringa* or *Quadração*) at the middle, and a carbonaceous layer of variable thickness (informally named as *Forro*) at the top. The seam has been extensively exploited and has a wide and continuous geographical distribution, with an average thickness ranging from 1.66 to 2.27 m. However, its net coal contents are less thick (0.47 to 1.40 m) due to interbedded levels of shales and siltstones [15].

Considering sequence stratigraphy as well as palaeontological and lithostratigraphic criteria, the Rio Bonito Formation was divided into two third-order sequences (LPTS-3 and LPTS-4) [13]. The Siderópolis Member was included in the LPTS-4 sequence and an Artinskian age for the coal seams was suggested [13].

Material and methods

The material was collected at the Porongos outcrop, located in the municipality of Lauro Müller, Santa Catarina state, Brazil, at the coordinates 28° 25' 21.4" S 49° 26' 24.0" W (Fig 1B).

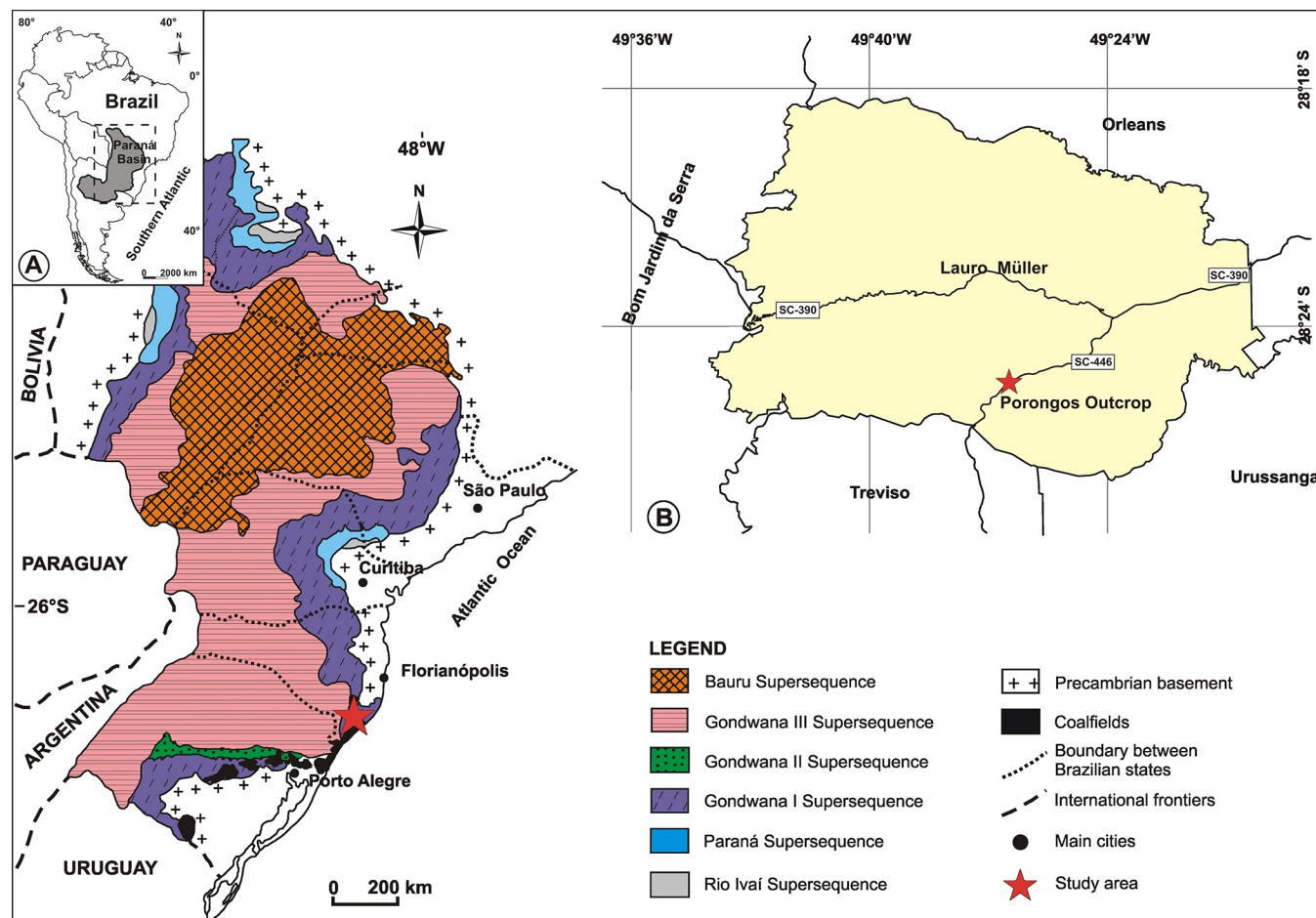


Fig 1. Location of the Paraná Basin and Porongos outcrop. A) Simplified geological map of the Paraná Basin, showing the major tectonic elements and indicating the studied locality (adapted from [11]). B) Geographical position of the Porongos outcrop and adjacent areas.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213854.g001>

Overlying a medium-grained sandstone (0.40 m), the Barro Branco coal seam is exposed as a 2.85 m succession consisting of 6 carbonaceous levels, each only a few centimetres thick (named here as Carbonaceous 1–6) interbedded by 5 medium-grey siltstones (Fig 2B).

In the field, 10 hand samples were collected from each outcropping level and taken to the *Laboratório de Paleobotânica e Evolução de Biomas, Museu de Ciências, Universidade do Vale do Taquari–Univates (LPEB/MCN/Univates)* for analysis under stereomicroscope (Zeiss Stemi 2000–C). Plant remains exhibiting characteristics of macro-charcoal (≥ 2.0 mm; black colour; silky lustre and; black streak on touch) [16, 17, 18], were mechanically extracted with the aid of forceps and needles. Subsequently, the plant remains were mounted on stubs with adhesive tabs, coated with gold, and investigated under Scanning Electron Microscope (SEM–Zeiss EVO LS15) at the *Parque Científico e Tecnológico do Vale do Taquari (TECNOVATES–Univates)*.

Anatomical features were measured with the use of the software ImageJ [19] from digital images. All the macro-charcoal and inertinite bearing rock samples collected are stored in the *LPEB/MCN/Univates Palaeobotanical Collection* under accession numbers PbUMCN1163–1168.

Maceral and reflectance analyses were conducted on the macro-charcoal containing samples at the *Laboratório de Análise de Carvão e Rochas Geradoras de Petróleo* of the *Universidade*

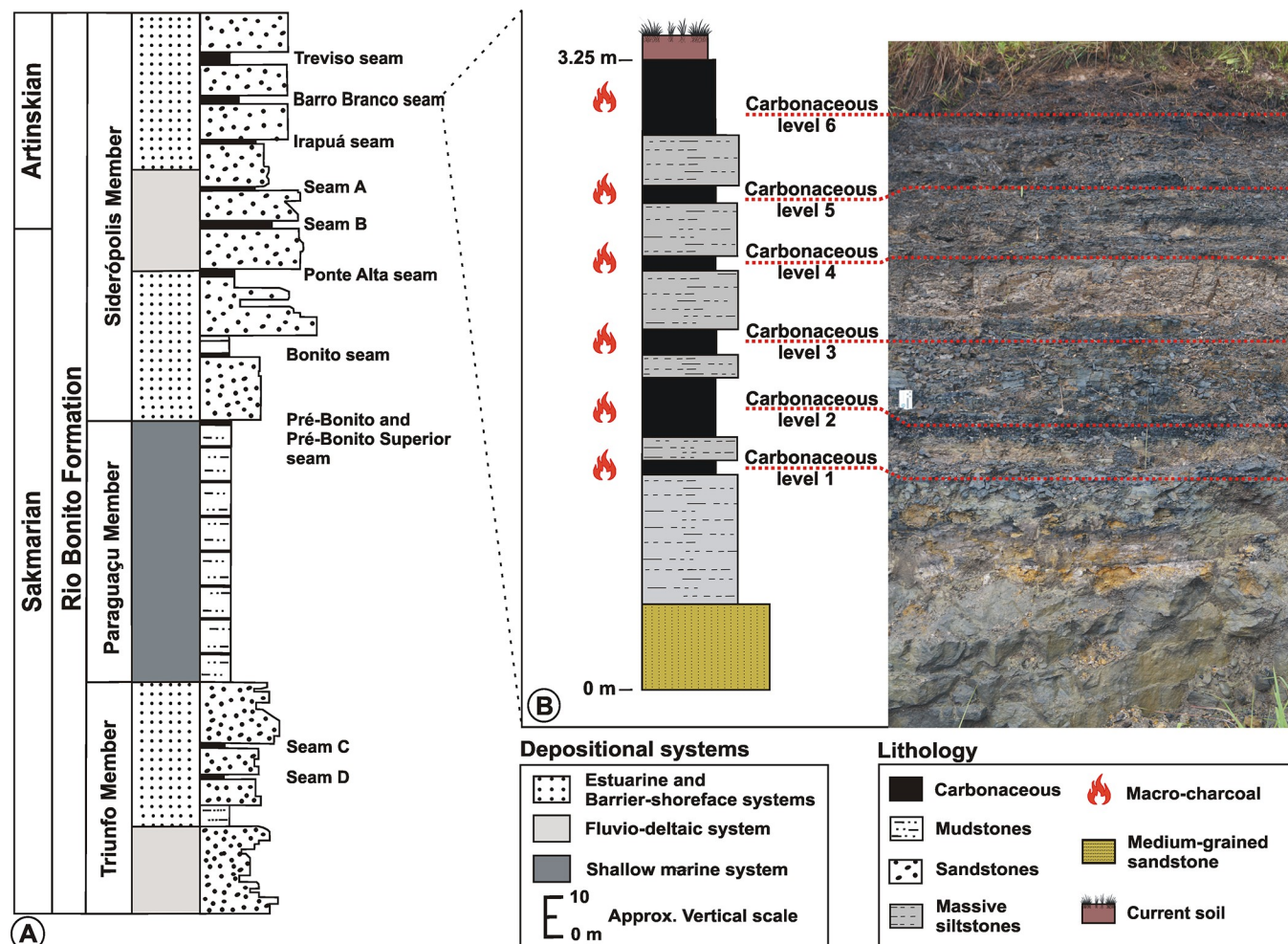


Fig 2. Stratigraphy of the Rio Bonito Formation and stratigraphic column of the Porongos outcrop. A) General stratigraphical framework of the Rio Bonito Formation in Santa Catarina state (adapted from [15]). B) Stratigraphical column of the Porongos outcrop showing the six macro-charcoal bearing layers.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213854.g002>

Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) by using the standard preparations for optical analysis [20]. The maceral analysis was based on 500 observation points [21] and classified according to the International Committee for Coal Petrology [22, 23, 24] standards. The reflectance values were determined according to [25] and charring temperature was estimated based on the inertinite reflectance average, calculated by the mathematical formula [$^{\circ}\text{C} = 184 + 118 \times (\text{light reflectance } \%)$] [26].

Results

Macro-charcoal overview

Macro-charcoal, ranging between 3–49 mm in width and 5–111 mm in length, was recovered from each of the six carbonaceous levels exposed at the Porongos outcrop (Fig 2B). The fragments show slightly abraded edges (Fig 3A) and are impregnated by pyrite (Fig 3B). Compression is slight and no *Bogenstrukturen* could be observed. No macro-charcoal was found in the greyish siltstones.

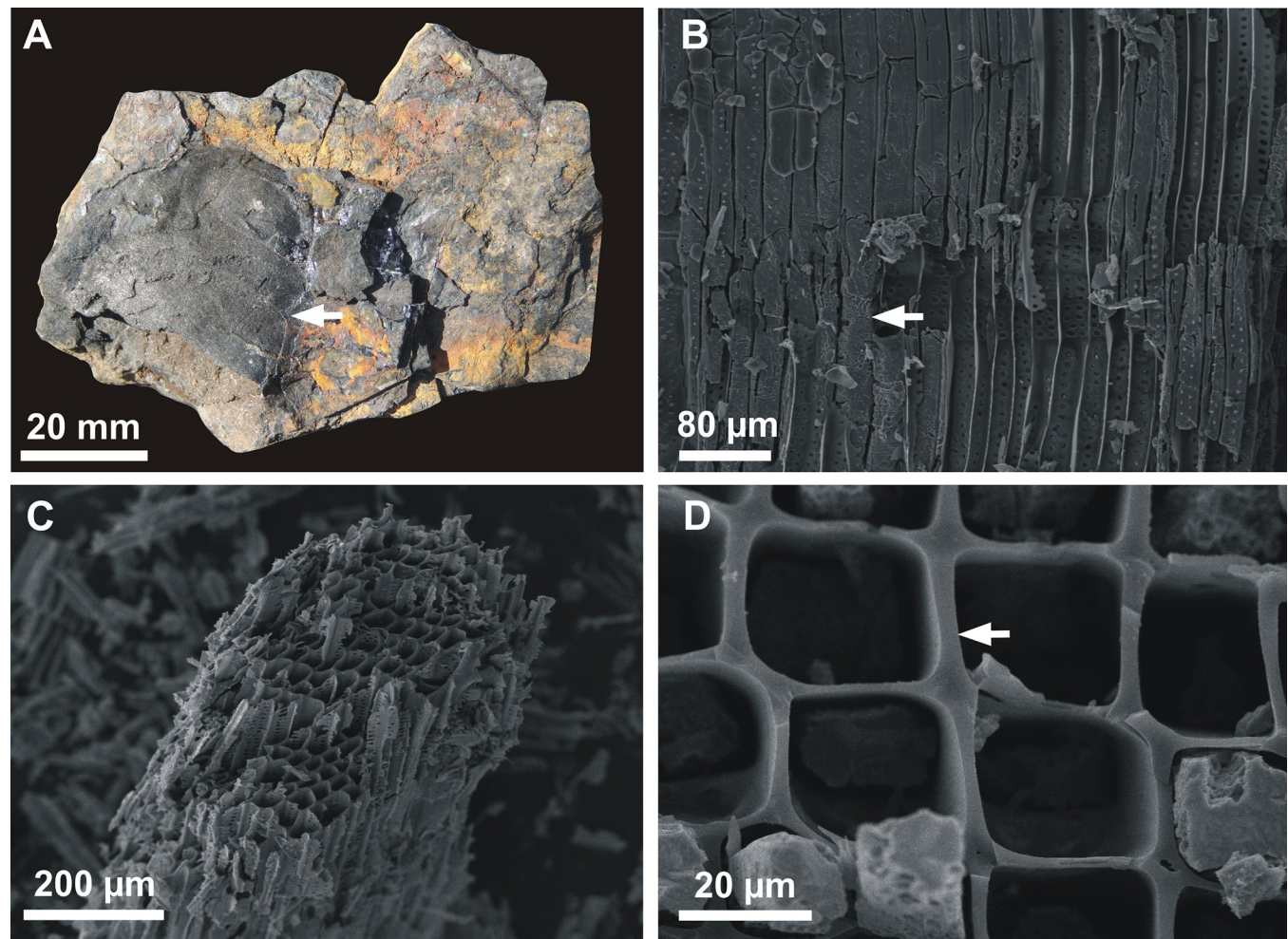


Fig 3. Overview of the macro-charcoal remains from Porongos outcrop. A) Fragment showing slightly abraded edges (sample PBUMCN 1167). B) Macro-charcoal impregnated by pyrite (fragment extracted from PBUMCN 1165). C) Well-preserved anatomical details (fragment extracted from PBUMCN 1168). D) Homogenized cell walls (fragment extracted from PBUMCN 1165).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213854.g003>

Macro-charcoal anatomy

Under SEM, the fragments show well-preserved anatomical details (Fig 3C) as well as homogenized cell walls (Fig 3D). It was possible to differentiate three anatomical patterns named as Porongos Charcoalified Wood Type 1, 2 and 3 (Table 1).

Porongos Charcoalified Wood Type 1 (S1 Fig). Pycnoxylic secondary wood with 16.7 µm (11.3–21.1 µm) wide tracheids, showing 1–2 seriate, sub-oppositely to alternately arranged pitting. Pits are bordered and contiguously distributed, ranging in shape from elliptical with 6.4 µm (4.3–9.6 µm) in width and 5.2 µm (4.1–6.5 µm) in height, to narrow elongate elliptical with 7.1 µm (5.3–10.1 µm) in width and 2.6 µm (1.9–3.3 µm) in height. Apertures are elliptical and damaged by charring. Axial parenchyma absent. Rays are homocellular and uni-seriate, 2–7 cells in height. Ray-cells are apparently procumbent and 24.6 µm (17.8–31.9 µm) in height, with non-measurable width due the fragmentation. Cell walls are homogenized with 2.2 µm (1.2–3.3 µm) in width. Cross-field pits are inconspicuous, and growth rings are not visible. This charcoalified wood type occurs in carbonaceous levels 2, 4, 5 and 6.

Porongos Charcoalified Wood Type 2 (S2 Fig). Pycnoxylic secondary wood, tracheids 20.1 μm (12.1–33 μm) wide, exhibiting 1–4 seriate alternately arranged pitting. Pits are bordered and contiguous to semi-contiguous, ranging in shape from circular with 4.5 μm (3.3–6.5 μm) in diameter, to elliptical with 5.8 μm (4.1–6.7 μm) in width and 3.6 μm (2.9–4.5 μm) in height. Apertures are damaged by charring and are not clearly visible. Axial parenchyma absent. Rays with 3–12 cells in height and presence of radial parenchyma. Tangential view of rays not observed. Ray-cells are procumbent with 22.7 μm (17.5–29.9 μm) in height and 75.9 μm (50.3–98.5 μm) in width. Cross-field pitting is araucarioid, composed of 5–8 pits [10.8 μm (7.9–12.5 μm) in width and 7.6 μm (6.5–8.6 μm) in height] per field. Cell walls are homogenized with 1.9 μm (1.3–2.9 μm) in width. Growth rings are not visible. This charcoalified wood type occurs in carbonaceous levels 1, 5 and 6.

Porongos Charcoalified Wood Type 3 (S3 Fig). Wood exhibiting the transition between primary and secondary xylem. Primary xylem containing tracheids with 19.9 μm (14.4–23.5 μm) in width, showing contiguous narrow elongate scalariform pitting with 15.1 μm (8.2–22.6 μm) in width and 1.9 μm (1.1–3.9 μm) in height. Secondary wood is pycnoxylic and bears tracheids with 19.6 μm (13.5–26.4 μm) in width, exhibiting 1–2 alternately arranged seriate pitting. Pits are bordered, ranging in shape from circular with 7.2 μm (6.4–8.6 μm) in diameter, to elliptical with 8.1 μm (5.9–11.1 μm) in width and 5.6 μm (4.7–7 μm) in height. Apertures are damaged by charring and not clearly observable. Radial parenchyma. Tangential view of rays is not seen. Ray-cells are procumbent with 26.4 μm (21.9–30.7 μm) in height and 92.4 μm (79.4–105.7 μm) in length. Cross-field pitting is araucarioid and composed of 5–8 alternately arranged bordered pits [6.7 μm (4.1–8.7 μm) in width and 4.8 μm (3.6–5.5 μm) in

Table 1. Summary of the anatomical characteristics of the Porongos Charcoalified Wood Types 1, 2 and 3.

Wood tissue	Wood type 1	Wood type 2	Wood type 3
Primary xylem	Non-preserved	Non-preserved	Preserved
Tracheids width	-	-	19.9 μm (average)
Pitting	-	-	Contiguous, scalariform
Pits	-	-	Narrow elongate, with 15.1 μm (average) of width, and 1.9 μm (average) high
Homogenised cell wall width	-	-	2.2 μm
Secondary xylem	Pycnoxylic	Pycnoxylic	Pycnoxylic
Taxonomic affinity	<i>Agathoxylon</i> sp.	<i>Agathoxylon</i> sp.	<i>Agathoxylon</i> sp.
Axial parenchyma	Absent	Absent	Absent
Tracheids width	16.7 μm (average)	20.1 μm (average)	19.6 μm (average)
Pitting	1–2 seriate, sub-oppositely to alternately arranged	1–4 seriate, alternately arranged	1–2 seriate, alternately arranged
Pits	Bordered, elliptical to narrow elongate elliptical	Bordered, circular to elliptical	Bordered, circular to elliptical
Ray type	Apparently homocellular	Homocellular	Homocellular
Ray width	Uniseriate	Non-preserved	Non-preserved
Ray height	2–7 cells	3–12 cells	2–4 cells
Ray cells	Apparently procumbent, 24.6 μm (average) high	Procumbent, 22.7 μm (average) high, and 75.9 μm (average) in length.	Procumbent, 26.4 μm (average) high, and 92.4 μm (average) in length.
Cross-field pitting	Non-preserved	Araucarioid, 5–8 pits per field	Araucarioid, 5–8 pits per field
Homogenised cell wall width	2.2 μm	1.9 μm	1.9 μm
Level of occurrence	2, 4, 5 and 6	1, 5 and 6	3 and 6

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213854.t001>

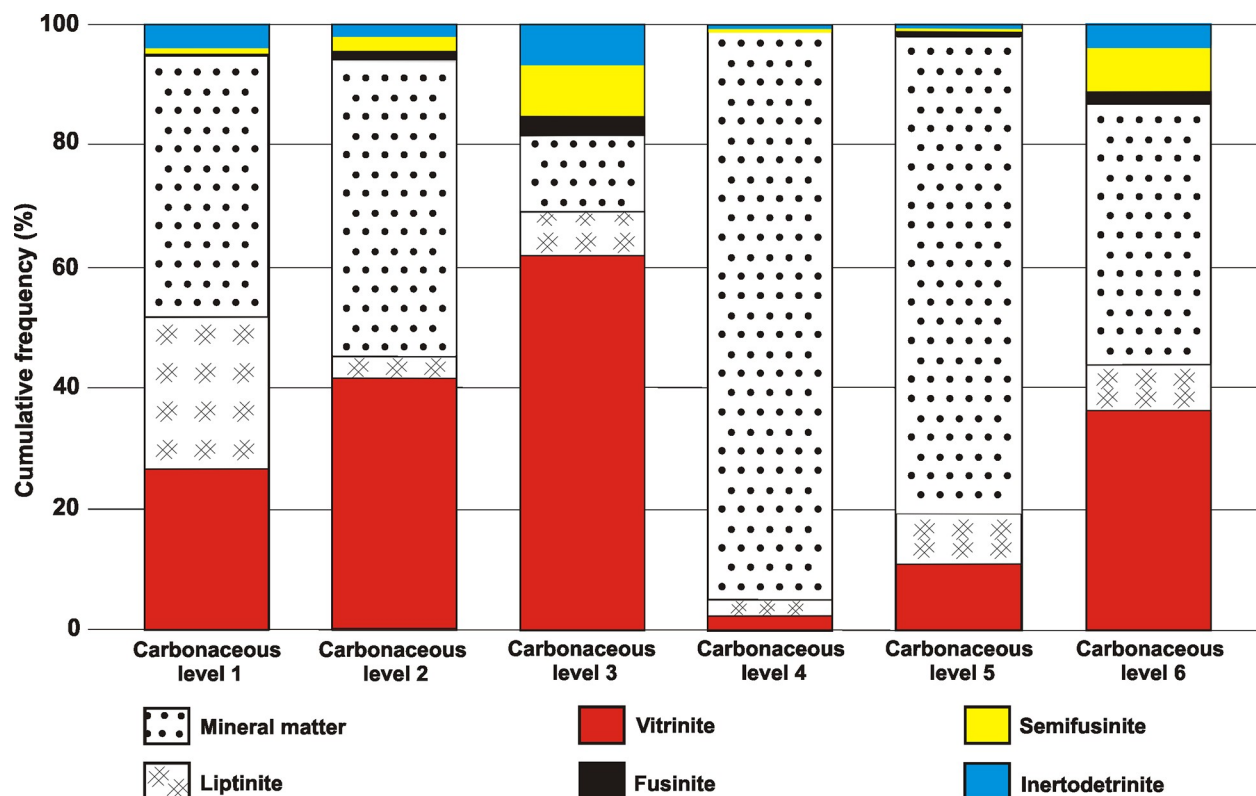


Fig 4. Maceral content of the six carbonaceous levels of the Barro Branco coal seam studied site. Values available on [S1 Table](#).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213854.g004>

height] per field. Cell walls are homogenized and 2.2 μm (1.2–3.2 μm) wide. Growth rings are not visible. This charcoallified wood type occurs in carbonaceous levels 3 and 6.

Coal petrography

Carbonaceous Level 1. Organic content (57%) is mainly composed of macerals of the vitrinite (26.8%) and liptinite (exclusively sporinite) groups (25%). The inertinite group is composed of fusinite (0.6%), semifusinite (0.8%) and inertodetrinite (3.8%). Mineral content (43%) is composed of clay (38.4%), pyrite (4.4%) and quartz (0.2%) (Fig 4). The reflectance value of vitrinite ranges from 0.619% to 0.86% (average 0.727%) and the reflectance value of inertinites ranges from 1.10% to 5.20% (average 2.00%) (Table 2).

Carbonaceous Level 2. Organic content (51%) is mainly composed of macerals of the vitrinite (41.4%) and liptinite (exclusively sporinite) groups (4.2%). The inertinite group is composed of fusinite (1.4%), semifusinite (2.2%) and inertodetrinite (2%). Mineral content (48.8%) is composed of clay (35.6%), pyrite (13%) and quartz (0.2%) (Fig 4). The reflectance values of vitrinite range from 0.558% to 0.853% (average 0.723%) and the reflectance values of inertinites range from 0.9% to 6.6% (average 2.40%) (Table 2).

Carbonaceous Level 3. Organic content (87%) comprises macerals of the vitrinite (61.8%) and liptinite (exclusively sporinite) groups (7.6%). The inertinite group is composed of fusinite (3%), semifusinite (8.2%) and inertodetrinite (7%). Mineral content (12.4%) is composed of clay (10%), pyrite (1.8%) and quartz (0.6%) (Fig 4). The reflectance values of vitrinite range from 0.57% to 0.895% (average 0.753%) and the reflectance values of inertinites range from 1.10% to 5.80% (average 2.79%) (Table 2).

Table 2. Reflectance values of vitrinites and inertinites of the six carbonaceous levels studied. Carbonaceous level (CL), Average (Avg), Standard deviation (SD), Minimum (Min), Maximum (Max) and number of measurements (n).

Level	Vitrinite reflectance (%)					Inertinite reflectance (%)					Charring temp. (°C)		
	Avg	SD	Min	Max	n	Avg	SD	Min	Max	n	Avg	Min	Max
CL 1	0.727	0.052	0.619	0.86	100	2.00	0.79	1.10	5.20	50	420	313	797
CL 2	0.723	0.069	0.558	0.853	100	2.40	1.05	0.90	6.60	50	467	290	962
CL 3	0.753	0.064	0.57	0.895	100	2.79	1.08	1.10	5.80	50	513	313	868
CL 4	0.692	0.006	0.509	0.827	100	1.88	0.60	0.90	3.40	50	405	290	585
CL 5	0.77	0.07	0.584	0.927	100	1.92	0.56	1.00	3.20	50	410	302	561
CL 6	0.791	0.073	0.626	0.982	100	2.58	1.37	0.90	7.30	50	488	290	1,045

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213854.t002>

Carbonaceous Level 4. Organic content (6%) consists macerals of the vitrinite (2.4%) and liptinite (exclusively sporinite) groups (2.6%). The inertinite group is composed of fusinite (0.6%), and inertodetrinite (0.4%). Mineral content (94%) is composed exclusively of clay (Fig 4). The reflectance values of vitrinite range from 0.509% to 0.827% (average 0.692%) and the reflectance values of inertinites range from 0.90% to 3.40% (average 1.88%) (Table 2).

Carbonaceous Level 5. Organic content (21%) contains macerals of the vitrinite (11.4%) and liptinite (exclusively sporinite) groups (8%). The inertinite group is composed of fusinite (0.6%), semifusinite (0.2%) and inertodetrinite (0.8%). Mineral content (79%) comprises clay (76.4%) and pyrite (2.6%) (Fig 4). The reflectance value of vitrinite ranges from 0.584% to 0.927% (average of 0.77%) and the reflectance values of inertinites ranges from 1.00% to 3.20% (average of 1.92%) (Table 2).

Carbonaceous Level 6. Organic content (57%) is mainly composed of macerals of the vitrinite (36.2%) and liptinite (exclusively sporinite) groups (7.8%). The inertinite group is composed of fusinite (2.2%), semifusinite (7.2%) and inertodetrinite (3.6%). Mineral content (43%) is composed of clay (40.6%) and pyrite (2.4%) (Fig 4). The reflectance values of vitrinite range from 0.626% to 0.982% (average 0.791%) and the reflectance values of inertinites range from 0.90% to 7.30% (average 2.58%) (Table 2).

Discussion

Palaeoenvironment and taphonomy

High inertinite contents in coals have frequently been reported from several Cisuralian coal deposits all over Gondwana (Fig 5) and in the Paraná Basin coal seams contents are variable, reaching >70% in some cases [1, 27, 28]. For the Barro Branco coal seam, a medium inertinite value of 14.6% was reported [15].

Macro-charcoal occurrences are also increasingly being reported for Gondwana (Fig 5), confirming that fire was a significant component of many terrestrial ecosystems on this palaeo-continent during the Cisuralian [4, 5, 6, 29]. In general, the Late Palaeozoic is considered a high-fire period of Earth's history, as, due to considerably elevated atmospheric oxygen concentrations, the ignition and spread of wildfires were primarily controlled by atmospheric composition and not as during other periods by climate [2, 6, 30, 31, 32, 33, 34]. Under such conditions, fire events would have been frequent events even in ever-wet biomes such as mires [2, 3, 6, 33].

The co-occurrence between high-inertinite contents and macro-charcoal has been demonstrated in Gondwanan coal-bearing strata [4, 5], but analysis of both types of data for the same samples are still rare. Examples of such analysis come from the Cisuralian deposits of the Bonito mine I (Bonito coal seam, Rio Bonito Formation, Santa Catarina State, Brazil) [36] and Dhanpuri Coal Mine (Barakar Formation, Sohagpur Coalfield, Madhya Pradesh, India) [6].

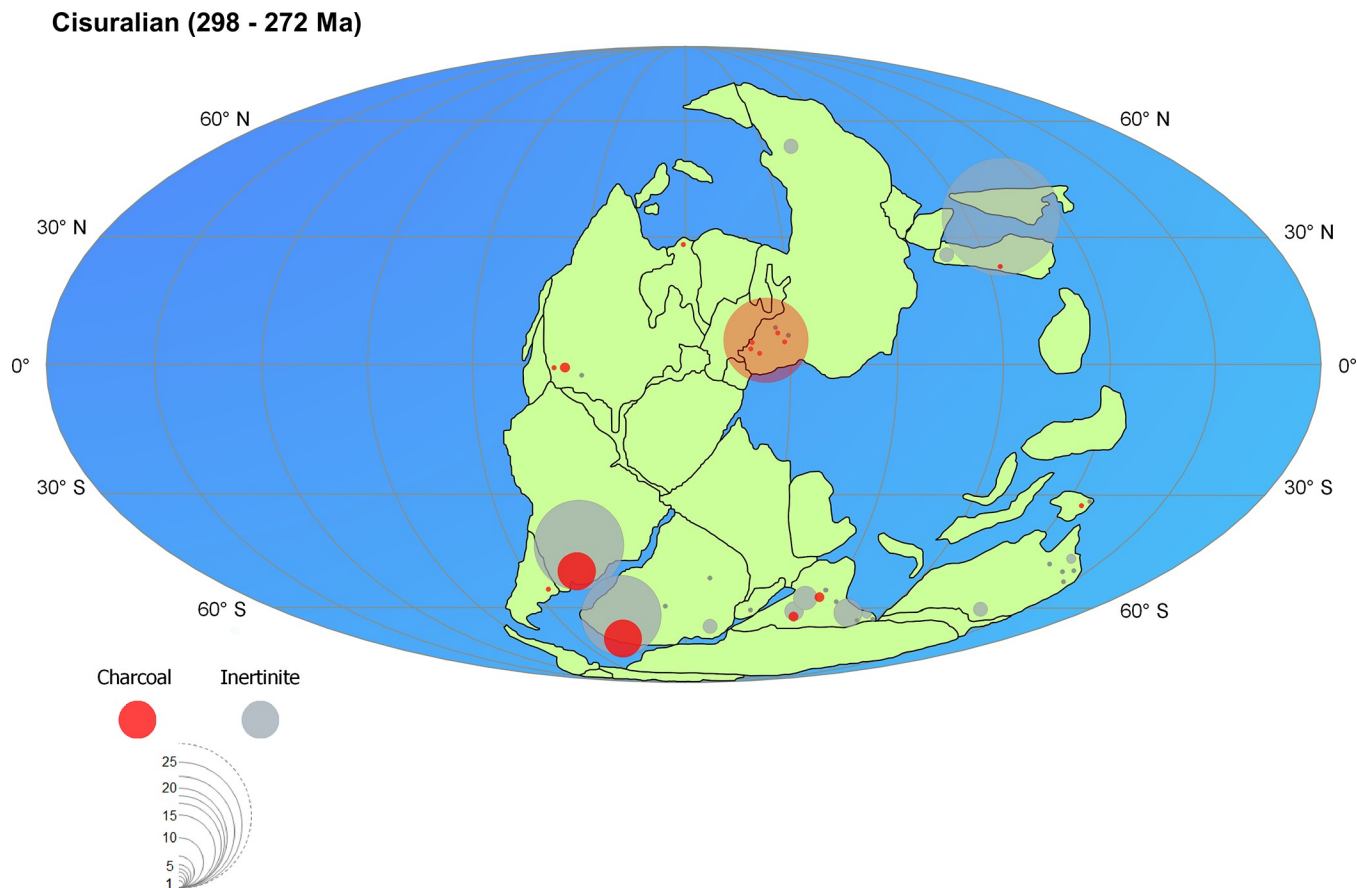


Fig 5. Global distribution of sedimentary charcoal and inertinites during the Cisuralian. Dots represent the number of described charcoal occurrences by basin and diameter varies according scale (detail of each occurrence in [S2 Table](#) and [S3 Table](#)). Map adapted from [\[35\]](#).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213854.g005>

Although a pyrogenic origin of fossil charcoal, or fusain, in clastic sediments as well as in coals and lignites has been widely accepted for the northern continents [\[37, 38, 39\]](#), the origin of the high-inertinite contents in the Permian Gondwanan coal-bearing strata remained an unresolved matter of debate amongst many coal-petrologists and palaeobotanists. Using integrated methods, it was demonstrated that the medium content of 42.2% inertinites in coals from the Dhanpuri Coal Mine in India was coincident with the occurrence of macro-charcoal, indicating that palaeo-wildfires reached the mire during the deposition of this peat [\[6\]](#). The occurrence of macro-charcoal in the six carbonaceous levels of the Porongos outcrop indicates that fire was a recurrent element in the depositional system studied here. However, inertinite contents vary from 1.0% in Carbonaceous Level 4 up to 18.2% in Carbonaceous Level 3 (= 7.4% medium).

Modern peat-forming environments are susceptible to surface or smouldering ground wildfires, especially during seasons of severe drought or during longer periods of reduced water tables [\[40, 41, 42, 43, 44\]](#). Under these conditions, surficial burning of previously deposited peat layers can be represented by a continuous layer of charred material [\[45\]](#). Such surface fires might ignite smouldering ground fires [\[46\]](#) and produce large quantities of charred remains [\[17, 18\]](#). Such continuous bands, rich in charred material, including abundant macro-charcoal and inertinites have not been found in any of the six carbonaceous levels investigated here. Therefore, in the studied area, there is no clear evidence to support an autochthonous surface or a smouldering ground burning of peat-forming material inside the mire.

The slightly abrasions observed on the edges of most macro-charcoal recovered from the six carbonaceous levels might indicate that such charred material was transported into the mire. This suggests that the fire events occurred some distance away from the place of final deposition. As the size of the macro-charcoal remains investigated here ranges from fragments of 3 mm x 5 mm to relatively larger fragments of 49 mm x 111 mm, they were transported inside the depositional environment via hydraulic flow and not by wind [18, 47]. That water transport may have resulted in a selective bias in favour of macroscopic charred wood remains, as no other charred plant organs were recorded in the six carbonaceous levels studied here [17, 48]. This taphonomical interpretation is congruent with the high mineral content present in all six carbonaceous levels, which suggest that the water influxes frequently transported sediments from an external source into the mire. Although macro-charcoal was transported by water and wind might also have acted and transported the minor charcoal particles into or within the mire. Such particles are petrographically represented by inertodetrinites, which are present in all the six carbonaceous levels. These fine charcoal particles can be lifted into the air and transported over the long distances, and might be formed by crown fires [17, 49, 50].

A reliable determination of the transport distance of the charred remains studied here is difficult. In modern environments, the presence of macro-charcoal in forest soils as well as lake and peat-forming deposits is usually considered as an indicator of a local wildfire event [51, 52, 53, 54, 55, 56, 57]. As the fossil assemblages studied here are composed predominantly of macro-charcoal remains (some of them of relatively large size), a hypautochthonous origin for such charred material might be suggested. This interpretation may be supported by the presence of only slight abrasions on the edges of the macro-charcoal from all six carbonaceous levels, which suggest that these fossils were transported only over the short distances [58]. Therefore, it seems that these recurrent palaeo-wildfires events occurred in the vicinity of the Barro Branco coal seam peat-forming environment. The lack of charred remains in the massive shale levels might be the result of an absence of palaeo-wildfires during the deposition of these sedimentary horizons or it might be a result of a taphonomical bias, since no other plant fossil remains were documented in these sedimentary layers. However, it is well-known that charcoal can be preserved in non-carbonaceous silty-grained sediments [18, 58].

Charring temperature and palaeo-wildfire classification

Experimental studies demonstrated that the reflectance values of charred plant tissues increase with increasing of charring temperatures [18, 59, 60, 61, 62]. Therefore, reflectance values of charcoal and inertinites have been used to estimate palaeo-wildfire temperatures [3, 6, 60, 63, 64, 65]. The average of the inertinite reflectance values from the six carbonaceous levels studied ranged from 1.88 (%) to 2.79 (%), and this indicates an estimated medium charring temperature that range from 405 to 513°C for these recurrent palaeo-wildfires (Table 2). As the average of the vitrinite reflectance values from the six carbonaceous levels are relatively low, ranging from 0.692 (%) to 0.791 (%) (Table 2), coalification did not affect inertinite reflectance [63]. However, the maximum reflectance value of 7.3%, indicates a charring temperature of 1,045°C.

Traditionally, wildfires have been classified into surface, ground and crown fires [17, 46, 66, 67]. Surface fire burns dead plant material derived from litter as well as living shrubby and herbaceous plants, and have a comparably low temperature [17, 46, 66, 68]. This type of fire produce most of the macro-charcoal [18], and might ignite smouldering ground fires, which burn organic-rich soil layers beneath the surface litter at low temperatures [17, 46, 69] and can last from days to years [70]. In contrast, crown fires have high temperatures, burn living vegetation from canopy as well as understorey trees [17, 46, 66, 71], and produce less macro-charcoal [18].

As the charred remains from the six carbonaceous levels studied here were transported, an *in-situ* observation of the depositional characteristics of these repeated wildfire events is not possible. Therefore, it is difficult to classify the fire type that produced the charred materials as well as indicate the fire intensity. However, maximum burning temperatures reached up to 1,045°C and suggest that at least in some cases intensive heat acted on the wood. Based on the predominance and relatively large size of the macro-charcoal remains in the six carbonaceous levels studied here, we speculate that they are result of repetitive surface palaeo-wildfires, as such a fire type produce most of the macro-charcoal [18, 72]. However, high-temperature crown fires might have also played a (subordinate) role in forming the macro-charcoal within the six carbonaceous levels.

Considering the taphonomical interpretation presented above, these charred remains produced by such palaeo-wildfires were transported and hydrodynamically sorted only over a short distance into the mire. This might explain the low abundance of macro-charcoal and inertinites in the six carbonaceous levels studied here, as not all charred remains produced by these fires may have reached the mire. It has been suggested that much of the inertinites present in Permian Gondwana coals resulted from low temperature surface palaeo-wildfires [17]. Some of these palaeo-wildfires occurred outside the mire and may have been followed by increased soil erosion, which could explain the high mineral content present not only in the coal seams analysed here, but also in many other Permian Gondwana coal deposits [17].

Taxonomical affinities and palaeoecological considerations

Although the charcoallified remains exhibit exceptional well-preserved internal anatomical details, due to their fragmentation and possible alterations at the time of charring, it is possible to establish a general taxonomic affinity for them. In charcoallified wood types 1 and 2 only the secondary xylem is preserved. In contrast, charcoallified wood type 3 exhibits part of the primary xylem, which is rarely preserved in Late Palaeozoic Gondwana woods [73]. This preserved part is small, and therefore, it seems more appropriate to establish the taxonomic affinity of charcoallified wood type 3 on the basis of secondary xylem, as more anatomical features such as tracheid pitting, rays and cross-field pitting are preserved in this tissue.

The three wood types identified here are rather similar in their secondary xylem characteristics and exhibit a typical gymnospermous anatomical pattern. The major anatomical differences between the secondary xylem of charcoallified wood types identified here, is that wood type 1 has tracheids with 1–2 seriate pitting and rays which are 2–7 cells high, while wood type 2 has tracheids with 1–4 seriate pitting and rays which are 3–12 cells high and wood type 3 has rays with 2–4 cells high (Table 1). These charcoallified wood types may not represent natural taxa, and it is quite possible that they are different morphological stages of distinct parts or ontogenetic stages of the same taxon [74].

The presence of tracheids bearing contiguous uniseriate and alternate multiseriate bordered pitting and the absence of axial parenchyma, allows for a generic classification of the secondary xylem of three wood types as *Agathoxylon* Hartig [75, 76, 77]. This taxonomical definition is more reliable for wood type 2 and 3 as both have araucarioid cross-field pitting, which is a typical anatomical pattern of *Agathoxylon* fossil wood secondary xylem [75, 76, 77]. This wood anatomical pattern is widespread in Late Palaeozoic and Mesozoic deposits of different geographical regions of the both hemispheres [5, 73, 77, 78, 79, 80]. It is related to several gymnosperm groups such as Cycadales, Caytoniales, Glossopteridales, Cordaitales, Voltziales, Ullmanniales, Cheirolepidiaceae and Araucariaceae [81, 82].

Macro-charcoal remains presenting secondary xylem with an *Agathoxylon* anatomical pattern have already been reported from several Lower Permian coal-bearing deposits of the Rio Bonito Formation [4, 7, 8, 83, 84]. In the Faxinal coalfield (a locality of the Rio Bonito Formation),

macro-charcoal remains with such an anatomy occur in association with abundant *Glossopteris* leaves, suggesting a biological connection between both [8, 84]. However, until now there is no unequivocal evidence, which could definitively indicate that to which group or groups of gymnosperms these *Agathoxylon*-like charcoals from the Rio Bonito Formation might really belong.

As the charcoalified assemblages of the six carbonaceous levels studied here are composed exclusively of the *Agathoxylon* type of wood, it is possible to infer that plants possessing such an anatomical pattern were the most important components of the biomass responsible for the maintenance of these repetitive palaeo-wildfires. The uniformity of the vegetation in the charcoalified assemblages of the six carbonaceous levels might suggest that these plants were well adapted to grow in an environmental, experiencing the repeated and recurrent palaeo-wildfires events.

Fire-adaptation is an ecological-evolutionary trend, observed in modern environment vegetation that is submitted to regular wildfires [85, 86, 87, 88], and has been considered as a key-factor in the evolution of Palaeozoic early conifers [89]. In the Faxinal coalfield, which can be considered as a palaeoenvironment disturbed by palaeo-wildfires and volcanic activity [8, 90], the presence of an abaxial trichome complex on *Glossopteris pubescens* leaves, a general xeromorphic feature of leaves in a wide variety of taxa, has been mentioned as a possible mechanism providing insulation against the heat produced by fire [91]. However, until now there is no clear evidence of any fire-adapted morphological structure in wood remains from Rio Bonito Formation, and further discoveries of fossil wood might shed some light about this complex ecological-evolutionary relation.

Conclusions

Based on the data and interpretations presented here, the following conclusions regarding the charcoalified assemblages from the six Barro Branco coal seams can be drawn:

1. The presence of macro-charcoal as well as inertinites in all six carbonaceous levels, provide the first evidence of the occurrence of repeated palaeo-wildfires during the deposition of the Barro Branco coal seam.
2. These recurrent palaeo-wildfires are related to the high palaeo-atmospheric O₂ concentrations proposed for the Lower Permian.
3. The macro-charcoal remains were transported inside the mire depositional system via hydraulic flow, and such water transport may have resulted in a selective bias in favour of charred wood remains. However, wind blow could also have acted and transported minor charcoal particles (inertodetrinites) inside the mire.
4. A hypoautochthonous origin for the macro-charcoal of all six levels might be suggested, and therefore, these repeated palaeo-wildfires events occurred in the vicinity of the Barro Branco coal seam peat-forming.
5. The reflectance values from the inertinites of all six levels indicate an estimated charring temperature reaching up to 1,045°C. This high charring temperature represents intense fire acting in the depositional system.
6. The study of the macro-charcoal from the six carbonaceous levels indicates the presence of secondary xylem with an *Agathoxylon*-like anatomical pattern.
7. The non-significant variation of the wood anatomy in the charcoalified assemblages throughout the six levels suggest that gymnospermous plants bearing *Agathoxylon*-like secondary xylem were one of the most important components of the biomass responsible for the maintenance of these recurrent palaeo-wildfires.

Supporting information

S1 Fig. Anatomical details of Porongos Charcoalified Wood Type 1. A, B and C) Tracheids exhibiting 1–2 seriate sub-oppositely to alternately arranged pitting. B and C) Bordered pits

with an elliptical to narrow elongate elliptical shape. B) Apertures damaged by charring process, however apparently elliptical. D) Uniseriate rays with 2–7 cells in height. E) Homocellular rays bearing apparently procumbent cells. F) Homogenized cell walls. All fragments were extracted from rock sample PBUMCN 1168.

(TIF)

S2 Fig. Anatomical details of Porongos Charcoalified Wood Type 2. A and B) Tracheids with 1–4 seriate alternately arranged pitting; pits are bordered ranging in shape from circular to elliptical. C and D) Rays with 3–12 cells in height and presence of radial parenchyma. E) Procumbent ray cells with araucarioid cross-field pitting composed of 5–8 pits per field. F) Homogenized cell walls. Fragments (A, B, D, E and F) extracted from PBUMCN 1163, and fragment (C) extracted from PBUMCN 1167.

(TIF)

S3 Fig. Anatomical details of Porongos Charcoalified Wood Type 3. A) Transition between primary and secondary xylem. B) Primary xylem tracheids exhibiting contiguous narrow elongate scalariform pitting, and homogenized cell walls. C) Secondary xylem tracheids exhibiting 1–2 alternately arranged seriate pitting; pits ranging in shape from circular to elliptical. D) Rays with procumbent cells and presence of radial parenchyma. E) Araucarioid cross-field pitting composed of 5–8 alternately arranged bordered pits per field. F) Secondary xylem homogenized cell walls. Fragments (A, C, D, E and F) extracted from rock sample PBUMCN 1165, and fragment (B) extracted from sample PBUMCN 1168.

(TIF)

S1 Table. Maceral content of the six carbonaceous levels of the Barro Branco coal seam studied site.

(DOCX)

S2 Table. Published records of charcoal in Lower Permian. Data based on [1,2,3,4], and additional sources not mentioned in these previous compilations.

(DOCX)

S3 Table. Published records of inertinites in Lower Permian coals. Data based on [1,2,3,4,5], and additional sources not mentioned in these previous compilations.

(DOCX)

Acknowledgments

The authors acknowledge the *Centro Tecnológico SATC* for support during fieldwork and access to the study area.

Author Contributions

Conceptualization: José Rafael W. Benicio, André Jasper, Luciane Garavaglia, Dieter Uhl.

Data curation: Luciane Garavaglia.

Formal analysis: André Jasper, Rafael Spiekermann, Luciane Garavaglia, Etienne Fabbrin Pires-Oliveira, Dieter Uhl.

Funding acquisition: André Jasper.

Investigation: José Rafael W. Benicio, André Jasper, Rafael Spiekermann, Etienne Fabbrin Pires-Oliveira, Neli Teresinha Galarce Machado, Dieter Uhl.

Methodology: José Rafael W. Benicio, André Jasper, Rafael Spiekermann, Neli Teresinha Galarce Machado, Dieter Uhl.

Project administration: André Jasper.

Resources: Neli Teresinha Galarce Machado.

Supervision: André Jasper.

Validation: José Rafael W. Benicio, André Jasper, Rafael Spiekermann.

Visualization: Rafael Spiekermann.

Writing – original draft: José Rafael W. Benicio, André Jasper, Rafael Spiekermann, Dieter Uhl.

Writing – review & editing: José Rafael W. Benicio, André Jasper, Rafael Spiekermann, Dieter Uhl.

References

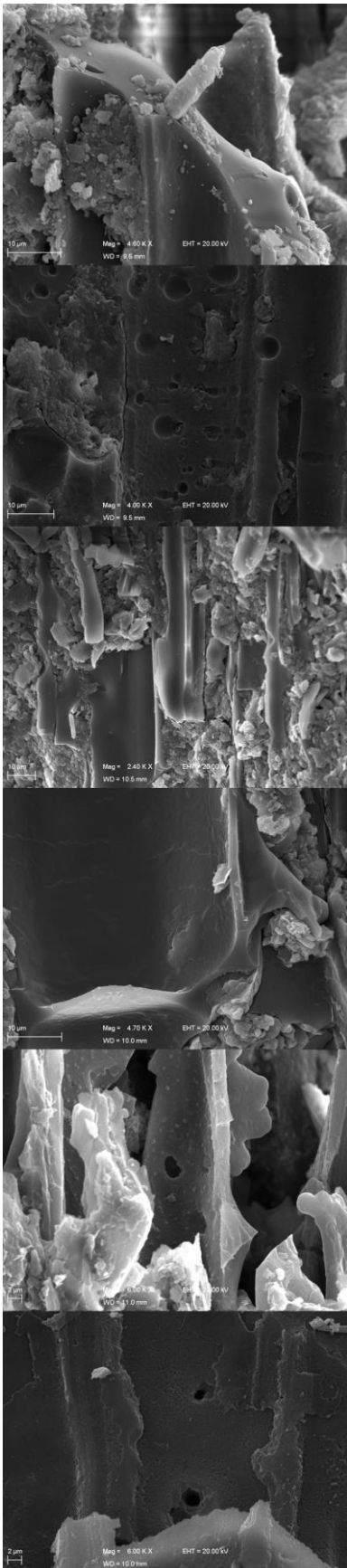
1. Diessel CF. The stratigraphic distribution of inertinite. *International Journal of Coal Geology*. 2010; 81(4):251–268.
2. Scott AC, Glasspool IJ. The diversification of Paleozoic fire systems and fluctuations in atmospheric oxygen concentration. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2006; 103(29):10861–10865.
3. Hudspeth V, Scott AC, Collinson ME, Pronina N, Beeley T. Evaluating the extent to which wildfire history can be interpreted from inertinite distribution in coal pillars: An example from the Late Permian, Kuznetsk Basin, Russia. *International Journal of Coal Geology*. 2012; 89:13–25.
4. Jasper A, Uhl D, Guerra-Sommer M, Bernardes-de-Oliveira MEC, Machado NTG. Upper Paleozoic charcoal remains from South America: multiple evidences of fire events in the coal bearing strata of the Paraná Basin, Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2011; 306(3–4):205–218.
5. Jasper A, Guerra-Sommer M, Hamad AMA, Bamford M, Bernardes-de-Oliveira MEC, Tewari R, et al. The burning of Gondwana: Permian fires on the southern continent—a palaeobotanical approach. *Gondwana Research*. 2013; 24(1):148–160.
6. Jasper A, Agnihotri D, Tewari R, Spiekermann R, Pires EF, Da Rosa ÁAS, et al. Fires in the mire: Repeated fire events in Early Permian 'peat forming' vegetation of India. *Geological Journal*. 2017; 52(6):955–969.
7. Jasper A, Manfroi J, Schmidt EO, Machado NTG, Konrad O, Uhl D, et al. Evidências paleobotânicas de incêndios vegetacionais no afloramento Morro do Papaléo, Paleozoico Superior do Rio grande do Sul, Brasil. *Geonomos*. 2011b; 19(1):18–27.
8. Degani-Schmidt I, Guerra-Sommer M, Oliveira Mendonça J, Mendonça Filho JG, Jasper A, Cazzulo-Klepzig M, Iannuzzi R, et al. Charcoalified logs as evidence of hypautochthonous/autochthonous wild-fire events in a peat-forming environment from the Permian of southern Paraná Basin (Brazil). *International Journal of Coal Geology*. 2015; 146:55–67.
9. Manfroi J, Jasper A, Guerra-Sommer M, Uhl D. Sub-arborescent lycophytes in coal bearing strata from the Artinskian (Early Permian/Cisuralian) of the Santa Catarina coalfield (Paraná Basin, SC, Brazil). *Revista Brasileira Paleontologia*. 2012; 15:135–140.
10. Milani EJ, Melo JHG, Souza PA, Fernandes LA, França AB. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobrás*. 2007; 15(2):265–287.
11. Milani EJ, Faccini UF, Scherer CMS, Araújo LM, Cupertino JA. Sequences and stratigraphy hierarchy of the Paraná Basin (Ordovician to Cretaceous). *Boletim do Instituto de Geociências/USP*. 1998; 29:125–173.
12. Schneider RL, Mühlmann H, Tommasi E, Medeiros RA, Daemon RF, Nogueira AA, et al. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia. *Anais da Sociedade Brasileira de Geologia*. 1974; 1:41–66.
13. Holz M, França AB, Souza PA, Iannuzzi R, Rohn RA. Stratigraphic chart of the Late Carboniferous/Permian succession of the eastern border of the Paraná Basin, Brazil, South America. *Journal of South American Earth Sciences*. 2010; 29:382–399.
14. Bortoluzzi CA, Piccoli AEM, Bossi GE, Guerra-Sommer M, Toigo MM, Pons MEH, et al. Pesquisa geológica na Bacia Carbonífera de Santa Catarina. *Pesquisas*. 1978; 11:33–192.

15. Kalkreuth W, Holz M, Mexias A, Balbinot M, Levandowski J, Willett J, et al. Depositional setting, petrology and geochemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 2. South Santa Catarina Coalfield, Brazil. *International Journal of Coal Geology*. 2010; 84:213–236.
16. Jones TP, Chaloner WG. Fossil charcoal, its recognition and palaeoatmospheric significance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 1991; 97(1–2):39–50.
17. Scott AC. The pre-Quaternary history of fire. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2000; 164, 281–329.
18. Scott AC. Charcoal recognition, taphonomy and uses in palaeoenvironmental analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2010; 291(1–2):11–39.
19. Rasband WS. ImageJ. U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA. 1997–2016. (<http://imagej.nih.gov/ij/>, last access: April 5th, 2018).
20. Bustin M, Cameron A, Grieve D, Kalkreuth W. Coal petrology—its principles, methods and applications. Geological Association of Canada, Short Course Notes, third edition, 230. 1989.
21. ISO 7404–3. Methods for the petrographic Analysis of Bituminous coal and Anthracite: Part 2. Methods of Determining Maceral Group Composition. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, 4. 1984.
22. International Committee for Coal Petrology (ICCP). International Handbook of Coal Petrography 2nd edition. Centre National de la Recherche Scientifique: Paris, France, 494. 1963.
23. International Committee for Coal Petrology (ICCP). The new vitrinite classification (ICCP System 1994). *Fuel*. 1998; 77:349–358.
24. International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP). The new inertinite classification (ICCP System 1994). *Fuel*. 2001; 80:459–471.
25. ISO 7404–5. Methods for the petrographic Analysis of Bituminous coal and Anthracite: Part 2. Methods of Determining Microscopically. The reflectance of vitrinite. International Organization for Standardization—(ISO), Geneva, 11. 1984.
26. Jones TP, Lim B. Extraterrestrial impacts and wildfires. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2000; 164(1–4):57–66.
27. Finkelman RB, Willett JC, Kalkreuth WD. Characterization of coals from the Candiota, Butiá-Leão and Santa Terezinha coal deposits, Rio Grande do Sul, Brazil. 31 st International Geologic Congress Abstracts Volume CD. 2000.
28. Kalkreuth W, Holz M, Kern M, Machado G, Mexias A, Silva M, et al. Petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 1. Santa Terezinha, Leão-Butiá and Candiota Coalfields, Rio Grande do Sul, Brazil. *International Journal of Coal Geology*. 2006; 68:79–116.
29. Yan M, Wan M, He X, Hou X, Wang J. First report of Cisuralian (Early Permian) charcoal layers within a coal bed from Baode, North China with reference to global wildfire distribution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2016; 459:394–408.
30. Berner RA. Modeling atmospheric O₂ over Phanerozoic time. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001; 65(5):685–694.
31. Beerling DJ, Lake JA, Berner RA, Hickey LJ, Taylor DW, Royer DL, et al. Carbon isotope evidence implying high O₂/CO₂ ratios in the Permo-Carboniferous atmosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2002; 66(21):3757–3767.
32. Glasspool IJ, Scott AC. Phanerozoic concentrations of atmospheric oxygen reconstructed from sedimentary charcoal. *Nature Geosciences*. 2010; 3:627–630.
33. Scott AC, Bowman DMJS, Bond WJ, Pyne SJ, Alexander ME. *Fire on Earth: An Introduction* First edn. Wiley-Blackwell: Chichester, 413. 2014.
34. Glasspool IJ, Scott AC, Waltham D, Pronina NV, Shao L. The impact of fire on the Late Paleozoic Earth system. *Frontiers in Plant Science*. 2015; 6:1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00001>
35. Ziegler A, Eshel G, Rees PM, Rothfus T, Rowley D, Sunderlin D, et al. Tracing the tropics across land and sea: Permian to present. *Lethaia*. 2003; 36(3):227–254.
36. Mendonça Filho JG, Guerra-Sommer M, Klepzig MC, Mendonça JO, Silva TF, Kern ML, et al. Permian carbonaceous rocks from the Bonito Coalfield, Santa Catarina, Brazil: organic facies approaches. *International Journal of Coal Geology*. 2013; 111:23–36.
37. Potonié R. Spuren von Wald- und Moorbrände in Vergangenheit und Gegenwart. *Jahrbuch der Preußischen Geologischen Landesanstalt zu Berlin*. 1929; 49(2):1184–1205.
38. Harris TM. A Liasso-Rhaetic flora in South Wales. *Proceedings of the Royal Society of London B*. 1957; 147:289–308.
39. Harris TM. Forest fire in the Mesozoic. *Journal of Ecology*. 1958; 46, 447–453.

40. Cypert E. The effects of fires in the Okefenokee Swamp in 1954 and 1955. *American Midland Naturalist*. 1961; 66:485–503.
41. Johnson B. The great fire of Borneo. *World Wild Life Fund*, Godalming, Surrey, 24. 1984.
42. Staub JR, Cohen AD. The Snuggedy Swamp of South Carolina: a back-barrier estuarine coal-forming environment. *Journal of Sedimentary Research*. 1979; 49(1):133–143.
43. Ellery W, Ellery K, McCarthy TS, Cairncross B, Oelofse R. A peat fire in the Okavango Delta, Botswana, and its importance as an ecosystem process. *African Journal of Ecology*. 1989; 27(1):7–21.
44. Davies GM, Gray A, Rein G, Legg CJ. Peat consumption and carbon loss due to smouldering wildfire in a temperate peatland. *Forest Ecology and Management*. 2013; 308:169–177.
45. Cohen AD, Spackman W, Raymond R Jr. Interpreting the characteristics of coal seams from chemical, physical and petrographic studies of peat deposits. In: Scott A.C. (Ed.), *Coal and Coal-bearing Strata: Recent advances: Geological Society Special Publication*. 1987; 32:107–125.
46. Pyne SJ, Andrews PL, Laven RD. *Introduction to Wildland fire*. J. Wiley and Sons, New York, 769. 1996.
47. Collinson ME, Steart DC, Scott AC, Glasspool IJ, Hooker JJ. Episodic fire, runoff and deposition at the Palaeocene–Eocene boundary. *Journal of the Geological Society*. 2007; 164(1):87–97.
48. Nichols GJ, Cripps JA, Collinson ME, Scott AC. Experiments in waterlogging and sedimentology of charcoal: results and implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2000; 164(1–4):43–56.
49. Clark JS. Particle motion and the theory of charcoal analysis: source area, transport, deposition and sampling. *Quaternary Research*. 1988; 30:67–80.
50. Clark JS, Patterson WA. Background and local charcoal in sediments: scales of fire evidence in the palaeo record. In: Clark J.S., et al. (Ed.), *Sediment Records of Biomass Burning and Global Change. Natoasi Series I*, 51. Springer Verlag, Berlin. 1997; 23–48.
51. Wein RW, Burzynski MP, Sreenivasa BA, Tolonen K. Bog profile evidence of fire and vegetation dynamics since 3000 years BP in the Acadian forest. *Canadian Journal of Botany*. 1987; 65(6):1180–1186.
52. Hörnberg G, Ohlson M, Zackrisson O. Stand dynamics, regeneration patterns and long-term continuity in boreal old-growth *Piceaabies* swamp-forests. *Journal of Vegetation Science*. 1995; 6(2):291–298.
53. Segerstrom U, Hörnberg G, Bradshaw R. The 9000-year history of vegetation development and disturbance patterns of a swamp-forest in Dalarna, northern Sweden. *The Holocene*. 1996; 6(1):37–48.
54. Ohlson M, Tryterud E. Long-term spruce forest continuity—a challenge for a sustainable Scandinavian forestry. *Forest Ecology and Management*. 1999; 124(1):27–34.
55. Ohlson M, Tryterud E. Interpretation of the charcoal record in forest soils: forest fires and their production and deposition of macroscopic charcoal. *The Holocene*. 2000; 10(4):519–525.
56. Blackford JJ. Charcoal fragments in surface samples following a fire and the implications for interpretation of subfossil charcoal data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2000; 164(1–4):33–42.
57. Lynch JA, Clark JS, Stocks BJ. Charcoal production, dispersal, and deposition from the Fort Providence experimental fire: interpreting fire regimes from charcoal records in boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research*. 2004; 34(8):1642–1656.
58. Uhl D, Hamad AA, Kerp H, Bandel K. Evidence for palaeo-wildfire in the Late Permian palaeotropicals—charcoalified wood from the Um Irna Formation of Jordan. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 2007; 144(3–4):221–230.
59. Jones TP, Scott AC, Cope M. Reflectance measurements and the temperature of formation of modern charcoals and implications for studies of fusain. *Bulletin de la Société Géologique de France*. 1991; 162(2):193–200.
60. Guo Y, Bustin RM. FTIR spectroscopy and reflectance of modern charcoals and fungal decayed woods: implications for studies of inertinite in coals. *International Journal of Coal Geology*. 1998; 37(1–2):29–53.
61. Scott AC, Glasspool IJ. Observations and experiments on the origin and formation of inertinite group macerals. *International Journal of Coal Geology*. 2007; 70(1–3):53–66.
62. McParland LC, Collinson ME, Scott AC, Campbell G. The use of reflectance for the interpretation of natural and anthropogenic charcoal assemblages. *Archaeological and Anthropological Sciences*. 2009; 1:249–261.
63. Uhl D, Hartkopf-Fröder C, Littke R, Kustatscher E. Wildfires in the late Palaeozoic and Mesozoic of the Southern Alps—the Anisian and Ladinian (mid Triassic) of the dolomites (northern Italy). *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*. 2014; 94(2):271–278.

64. Mahesh S, Murthy S, Chakraborty B, Roy MD. Fossil charcoal as palaeofire indicators: taphonomy and morphology of charcoal remains in Sub-Surface Gondwana Sediments of South Karanpura Coalfield. *Journal of the Geological Society of India*. 2015; 85(5):567–576.
65. Shivanna M, Murthy S, Gautam S, Souza PA, Kavali PS, Bernardes-de-Oliveira MEC, et al. Macroscopic charcoal remains as evidence of wildfire from late Permian Gondwana sediments of India: Further contribution to global fossil charcoal database. *Palaeoworld*. 2017; 26(4):638–649.
66. Davis KP. *Forest Fire-Control and Use*. McGraw-Hill, New York, 584. 1959.
67. Scott AC. Observations on the nature and origin of fusain. *International Journal of Coal Geology*. 1989; 12(1–4):443–475.
68. Scott AC, Cripps JA, Collinson ME, Nichols GJ. The taphonomy of charcoal following a recent heathland fire and some implications for the interpretation of fossil charcoal deposits. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2000; 164(1–4):1–31.
69. Usup A, Hashimoto Y, Takahashi H, Hayasaka H. Combustion and thermal characteristics of peat fire in tropical peatland in Central Kalimantan, Indonesia. *Tropics*. 2004; 14:1–19.
70. Rein G, Cleaver N, Ashton C, Pironi P, Torero JL. The severity of smouldering peat fires and damage to the forest soil. *Catena*. 2008; 74:304–309.
71. Scott AC, Jones TP. The nature and influence of fire in Carboniferous ecosystems. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*. 1994; 106:91–112.
72. Stocks BJ, Kauffman JB. Biomass consumption and behavior of wildland fires in boreal, temperate, and tropical ecosystems: Parameters necessary to interpret historic fire regimes and future fire scenarios. In *Sediment, records of biomass burning and global change*. Springer, Berlin, Heidelberg. 1997; 169–188.
73. Kurzawe FK, Merlotti S. O complexo Dadoxylon-Araucarioxylon, Carbonífero e Permiano do Gondwana: estudo taxonômico do gênero Araucarioxylon. *Pesquisas em Geociências*. 2010; 37(1):41–50.
74. Uhl D, Kerp H. Wildfires in the Late Palaeozoic of Central Europe—The Zechstein (Upper Permian) of NW-Hesse (Germany). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2003; 199:1–15.
75. Bamford MK, Philippe M. Jurassic–Early Cretaceous Gondwanan homoxylous woods: a nomenclatural revision of the genera with taxonomic notes. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 2001; 113(4):287–297. PMID: 11179718
76. Philippe M, Bamford MK. A key to morphogenera used for Mesozoic conifer-like woods. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 2008; 148(2–4):184–207.
77. Philippe M, Pacyna G, Wawrzyniak Z, Barbacka M, Boka K, Filipiak P, Uhl D. News from an old wood—*Agathoxylon keuperianum* (Unger) nov. comb. in the Keuper of Poland and France. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 2015; 221:83–91.
78. Philippe M, Barbacka M, Gradinaru E, Iamandei E, Iamandei S, Kázmér M, et al. Fossil wood and Mid-Eastern Europe terrestrial palaeobiogeography during the Jurassic–Early Cretaceous interval. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 2006; 142(1–2):15–32.
79. Uhl D, Jasper A, Schweigert G. Die fossile Holzgattung *Agathoxylon* Hartig im Nusplinger Plattenkalk (Ober-Kimmeridgium, Schwäbische Alb). *Archaeopteryx*. 2012; 30:16–22.
80. Degani-Schmidt I, Guerra-Sommer M. Charcoalified *Agathoxylon*-type wood with preserved secondary phloem from the Lower Permian of the Brazilian Parana Basin. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 2016a; 226:20–29.
81. Prevec R, Labandeira CC, Neveling J, Gastaldo RA, Looy CV, Bamford M, et al. Portrait of a Gondwanan ecosystem: a new late Permian fossil locality from KwaZulu-Natal, South Africa. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 2009; 156(3–4):454–493.
82. Philippe M. How many species of *Araucarioxylon*? *Comptes Rendus Palevol*. 2011; 10:201–208.
83. Jasper A., Uhl D, Guerra-Sommer M, Mosbrugger V. Palaeobotanical evidence of wildfires in the late Palaeozoic of South America—Early Permian, Rio Bonito Formation, Paraná basin, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. 2008; 26(4):435–444.
84. Jasper A, Uhl D, Guerra-Sommer M, Abu Hamad A, Machado NT. Charcoal remains from a tonstein layer in the Faxinal Coalfield, Lower Permian, southern Paraná Basin, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 2011c; 83(2):471–481.
85. Barro SC, Conard SG. Fire effects on California chaparral systems: an overview. *Environment International*. 1991; 17(2–3):135–149.
86. Gignoux J, Clobert J, Menaut JC. Alternative fire resistance strategies in savanna trees. *Oecologia*. 1997; 110(4):576–583. <https://doi.org/10.1007/s004420050198> PMID: 28307253
87. Simon MF, Grether R, de Queiroz LP, Skema C, Pennington RT, Hughes CE et al. Recent assembly of the Cerrado, a neotropical plant diversity hotspot, by in situ evolution of adaptations to fire. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2009; 106(48):20359–20364.

88. Simon MF, Pennington T. Evidence for adaptation to fire regimes in the tropical savannas of the Brazilian Cerrado. *International Journal of Plant Sciences*. 2012; 173(6):711–723.
89. He T, Belcher CM, Lamont BB, Lim SL. A 350-million-year legacy of fire adaptation among conifers. *Journal of Ecology*. 2016; 104(2):352–363.
90. Simas MW, Guerra-Sommer M, Mendonça Filho JG, Cazzulo-Klepzig M, Formoso MLL, Degani-Schmidt I, et al. An accurate record of volcanic ash fall deposition as characterized by dispersed organic matter in a Lower Permian tonstein layer (Faxinal Coalfield, Paraná Basin, Brazil). *Geologica Acta: an international earth science journal*. 2013; 11(1):45–47.
91. Degani-Schmidt I, Guerra-Sommer M. Epidermal morphology and ecological significance of *Glossopteris pubescens* nom. nov. From the Brazilian Permian (Sakmarian). *Review of Palaeobotany and Palynology*. 2016b; 232:119–139.



The first evidence of palaeo-wildfire from the Itararé Group, southernmost portion of the Paraná Basin, Brazil

Manuscript Details

Manuscript number SAMES_2019_47

Title The first evidence of palaeo-wildfire from the Itararé Group, southernmost portion of the Paraná Basin, Brazil.

Article type Research Paper

Abstract

Fossil charcoal is usually considered as the most reliable tool for the recognition of palaeo-wildfires. In the present communication, we provide the first detailed description of macro-charcoal from the Itararé Group, Paraná Basin, Brazil. These fragments were transported prior to final deposition and only limited anatomical details are recognizable, preventing a taxonomical establishment. As a Pennsylvanian age is assumed for the Itararé Group, these macro-charcoals probably represent the first unequivocal macroscopic evidence of palaeo-wildfires for the Carboniferous of Gondwana. Further discoveries of macro-charcoals in the Itararé Group as well as in contemporaneous deposits from other regions of Gondwana, are necessary to shed a light on the fire dynamics during the Late Palaeozoic Ice Age.

Keywords Macro-charcoal; Pennsylvanian; Palaeo-wildfires; Barrocada outcrop.

Taxonomy Sedimentary Environments, South American Stratigraphy

Corresponding Author André Jasper

Corresponding Author's Institution Universidade do Vale do Taquari - Univates

Order of Authors José Rafael Wanderley Benício, André Jasper, Rafael Spiekermann, Cibele Inês

Rockenbach, Joice Cagliari, Etienne Fabbrin Pires-Oliveira, Dieter Uhl

Suggested reviewers Rose Prevec, Deepa Agnihotri, Annette Götz, margot sommer

Submission Files Included in this PDF

File Name [File Type]

Cover_Letter_Benicio_et_al.pdf [Cover Letter]

Man_Benício_et_al-JSAES.docx [Manuscript

File] Figure_1.TIF [Figure]

Figure_2.TIF [Figure]

To view all the submission files, including those not included in the PDF, click on the manuscript title on your EVISE Homepage, then click 'Download zip file'.

Research Data Related to this Submission

There are no linked research data sets for this submission. The following reason is given: Data will be made available on request

January 25, 2019.

Submission of manuscript to JSAES

Dear Prof. Dr. Reinhardt Fuck,

Please find attached the manuscript: ***The first evidence of palaeo-wildfire from the Itararé Group, southernmost portion of the Paraná Basin, Brazil***, authored by J.R.W. Benício et al., which we want to offer to the *JOURNAL OF SOUTH AMERICAN EARTH SCIENCES* to be considered for publication as *SHORT NOTE*.

Although well known for the overlying Rio Bonito Formation, no evidence of palaeo-wildfires is so far described for the Itararé Group. Consequently, our results expand the stratigraphic distribution of macro-chacoal for the Paraná Basin, giving support to further studies in the strata.

The content of this manuscript has not been published or submitted for publication elsewhere and all authors agree with the content of the manuscript in the submitted form.

Potential reviewers for this manuscript are listed in the submission

system. Yours sincerely,



André Jasper

Corresponding Author

To the
Editorial Office – Regional Editor
JOURNAL OF SOUTH AMERICAN EARTH SCIENCES

Universidade do Vale do
Taquari – Univates Avenida Avelino Tallini, 171 –
Bairro Universitário – ZIP 95914-014
Lajeado – Rio
Grande do Sul – Brazil Phone
+55(51)3714-7000 – Fax
+55(51)3714-7001
E-Mail: ajasper@univates.br

The first evidence of palaeo-wildfire from the Itararé Group, southernmost portion of the Paraná Basin, Brazil

José Rafael W. Benício¹, André Jasper^{1,*}, Rafael Spiekermann¹, Cibele I. Rockenbach¹, Joice Cagliari², Etienne Fabbrin Pires-Oliveira³, Dieter Uhl⁴

¹ Laboratório de Paleobotânica e Evolução de Biomas, Museu de Ciências Naturais, Universidade do Vale do Taquari – Univates, Lajeado, Rio Grande do Sul, Brazil

² Universidade do Vale do Rio Dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Geologia, São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brazil

³ Laboratório de Paleobiologia, Universidade Federal do Tocantins, Porto Nacional, Tocantins, Brazil

⁴ Senckenberg Forschung Institut und Naturmuseum, Frankfurt am Main, Germany

* Corresponding author: ajasper@univates.br

Abstract

Fossil charcoal is usually considered as the most reliable tool for the recognition of palaeo-wildfires. In the present communication, we provide the first detailed description of macro-charcoal from the Itararé Group, Paraná Basin, Brazil. These fragments were transported prior to final deposition and only limited anatomical details are recognizable, preventing a taxonomical establishment. As a Pennsylvanian age is assumed for the Itararé Group, these macro-charcoals probably represent the first unequivocal macroscopic evidence of palaeo-wildfires for the Carboniferous of Gondwana. Further discoveries of macro-charcoals in the Itararé Group as well as in contemporaneous deposits from other regions of Gondwana, are necessary to shed a light on the fire dynamics during the Late Palaeozoic Ice Age.

Keywords: Macro-charcoal; Pennsylvanian; Palaeo-wildfires; Barrocada outcrop.

1. Introduction

Fire is a rapid oxidative reaction that has an important influence on the dynamics, modification and evolution of terrestrial vegetation ecosystems, at least since the Late Silurian (Glasspool et al., 2004; Bowman et al., 2009; Pausas and Keely, 2009). Macro-charcoal, which is produced during combustion of vegetative matter, is a widely used tool to reconstruct palaeo-wildfires during Earth's history (Scott, 2010).

For the Early Permian of the Paraná Basin (Rio Bonito Formation) and also for other areas of Gondwana there is an increasing number of reports of macro-charcoal demonstrating that palaeo-wildfires were common events in many ecosystems during this period on the southern continent (e.g. Mendonça-Filho et al., 2013; Degani-Schmidt et al., 2015; Manfroi et al., 2015; Jasper et al., 2011, 2013, 2016, 2017). However, there are still large stratigraphic gaps in our knowledge about the occurrence of palaeo-wildfires during the Late Palaeozoic in the Paraná Basin and so far no such data have been provided from the sediments of the Itararé Group in this basin.

The Itararé Group deposits represent the glaciation and deglaciation stages of the Late Palaeozoic Ice Age in the Paraná Basin (e.g. Rocha-Campos et al., 2008). In the present study, we provide the first detailed description of macro-charcoal preserved in deposits of the Itararé Group at the Barrocada outcrop, Cachoeira do Sul municipality, Rio Grande do Sul state, southernmost portion of the Paraná Basin, Brazil (Fig. 1a).

2. Geological setting

The Paraná Basin is a large intracratonic basin, which covers the southern-central part of Brazil as well as parts of Argentina, Uruguay and Paraguay. Milani et al. (1998) divided the basin into six supersequences defined as Rio Ivaí (Ordovician/Silurian), Paraná (Devonian), Gondwana I (Carboniferous/Early Triassic), Gondwana II (Late Triassic), Gondwana III

(Jurassic/Early Cretaceous) and Bauru (Late Cretaceous). The three first supersequences represent major transgressive-regressive cycles of the Palaeozoic Sea, while the other ones comprise continental sedimentary successions and Mesozoic magmatic rocks (Milani et al., 1998, 2007).

According to Cagliari et al. (2014), the Barrocada outcrop located in the southern Paraná Basin is inserted in the Gondwana I supersequence and is stratigraphically characterised by two major lithological intervals. The lower interval is assigned to the Itararé Group and is mostly composed of dark grey siltstones and rhythmites with dropstones, deposited in a glacial-influenced environment. The upper interval corresponds to the Rio Bonito Formation and comprises conglomerate, arkosic and quartz sandstones, siltstones, carbonaceous siltstone, and coal, deposited in coastal and shallow marine environments. Two ash-fall layers occur interbedded with the carbonaceous siltstone and coal-bearing deposits inserted in the middle portion of the Rio Bonito Formation at the Barrocada outcrop (Fig. 1b).

Radiometric dating indicates that the Rio Bonito Formation ash-fall layers preserved at the Barrocada outcrop were deposited between Sakmarian and Kungurian (Cagliari et al., 2014). In the vicinities of the Barrocada outcrop, Cagliari et al. (2016) radiometrically dated an ash-fall horizon from the uppermost portion of the Itararé Group and another from the Rio Bonito Formation, and the age obtained by the authors was Kasimovian–Moscovian for the first and Ghzelian–Asselian for the latter. A recent reevaluation of the Rio Bonito Formation U-Pb framework in the southern portion of the Paraná Basin indicates an Asselian age for this lithostratigraphic unit and suggest that Itararé Group glaciation and terminal deglaciation in this region have occurred during the Pennsylvanian (Griffis et al., 2018).

3. Material and methods

Rock samples were extracted from a horizontally bedded mica-rich medium- to dark-grey siltstone in the uppermost portion of the Itararé Group at the Barrocada outcrop (Fig. 1b). The siltstone samples were investigated at the *Laboratório de Paleobotânica e Evolução de Biomas* of the *Universidade do Vale do Taquari – Univates* with the use of a stereomicroscope (Zeiss Stemi 2000 - C), and a total of 22 wood remains were mechanically extracted with the use of forceps and preparation needles. These fragments were mounted on stubs with adhesive tabs, coated with gold, and anatomically investigated under a Scanning Electron Microscope (SEM - Zeiss EVO LS15) at the *Parque Científico e Tecnológico do Vale do Taquari* (TECNOVATES) of the *Universidade do Vale do Taquari – Univates*.

The studied material is stored in the Palaeobotanical Collection of the *Laboratório de Paleobotânica e Evolução de Biomas, Museu de Ciências Naturais* of the *Universidade do Vale do Taquari – Univates*; the siltstone samples are stored under accession numbers PbUMCN 1186 to 1190, and the analysed stubs are stored under accession numbers SEMUMCN 044 and 045.

4. Results and discussion

All the investigated wood remains exhibit the following characteristics: black color and streak on touch, splintery fracture, silky luster, size larger than 1 mm, preservation of internal anatomical details, and homogenized cell walls (Fig. 2). These characteristics are considered as diagnostic for macro-charcoal (e.g. Jones and Chaloner, 1991; Scott, 1989, 2000, 2010). Therefore, the palaeobotanical material described here can unambiguously be interpreted as macro-charcoal produced by palaeo-wildfire.

Although by definition macroscopic (cf. Scott, 2010), the charcoalfied fragments documented here are small (Fig. 2a) and their size range from 2.5 x 7.4 mm to 3.2 x 12 mm. The specimens are highly compressed and severely shattered, and their edges are abraded. The latter could suggest transport over some distance prior to final deposition (e.g. Nichols et al., 2000; Uhl and Kerp, 2003; Uhl and Montenari, 2011, Uhl et al., 2012), and the mechanical stress experienced during such transport may have resulted in the fragmentation of these charred wood remains. A possible reworking of the macro-charcoal fragments should not be completely excluded, and they might originally belong to older deposits that are also related to the Itararé Group. However, clear evidence of erosional reworking such as intraclasts and rip-up clasts were not observed in the horizontally bedded siltstone from which the charcoal was extracted.

As the investigated macro-charcoal remains are very shattered and poorly preserved, only limited anatomical details can be observed, and thus, it is not possible to establish a taxonomic affiliation for them. In some specimens it is possible to observe shot-like holes in the tracheids cell walls (Fig. 2d, e, f), which might have been produced by microorganism such as fungal hyphae during the wood decomposition process (see El Atfy et al., *in press*, Fig. 1c, d and f). As charcoal is highly resistant against biodegradation, these structures were probably formed prior to charring (El Atfy et al., *in press*).

The macro-charcoal fragments described here, provide the first evidence for the occurrence of palaeo-wildfires during the deposition of the Itararé Group in the Paraná Basin. Charcoalfied remains have been reported from several Carboniferous deposits of the Northern Hemisphere, indicating that palaeo-wildfires frequently occurred in the Euramerican palaeoecosystems during this geological period (e.g. Nichols and Jones, 1992; Cunningham et al., 1993; Scott and Jones, 1994; Falcon-Lang, 1999; Falcon-Lang, 2000; Uhl et al., 2004; Scott, 2000; Scott and Glasspool, 2006; Scott et al., 2010). This high-fire scenario is probably related to the elevated palaeo-atmospheric concentrations of O₂ reconstructed for the Late Palaeozoic

(e.g. Scott, 2000; Scott and Glasspool, 2006; Glasspool et al., 2015). However, in contrast to the Northern Hemisphere, no detailed description of macro-charcoal was published for the Carboniferous of Gondwana until now, and also reports of pyrogenic inertinites in Carboniferous coal seams from Gondwana are extremely rare (e.g. Diessel, 2010). Assuming a Pennsylvanian age for the Itararé Group (Cagliari et al., 2014, 2016; Griffis et al., 2018), the macro-charcoal remains described here are probably the first unequivocal macroscopic evidence for palaeo-wildfires for the Carboniferous of Gondwana.

So far, it is not possible to interpret whether the macro-charcoal assemblage represents a single or more than one palaeo-wildfire event. Thus, nothing can be stated about the extent and frequency of the palaeo-wildfires occurring during deposition of the Itararé Group. It is only possible to state that the necessary environmental conditions for the occurrence of fire, such as an ignition source, biomass and appropriate oxygen levels, were available during the deposition of this lithostratigraphic unit. Further explorations in the field and discoveries of charcoalified assemblages in the Itararé Group as well as in contemporaneous deposits from other regions of Gondwana are clearly necessary to understand the fire dynamics during the end of the Late Palaeozoic Ice Age in the Paraná Basin.

5. Conclusions

Based on the data presented above we can draw the following conclusions: (1) the presence of macro-charcoal preserved in deposits of the Itararé Group at the Barrocada outcrop provides the first evidence for the occurrence of palaeo-wildfire during the deposition of this lithostratigraphic unit; (2) the macro-charcoal remains were probably transported over some distance prior to final deposition; (3) necessary preconditions for the occurrence of fire, such as an ignition source, biomass and appropriate oxygen levels, were available during the deposition of the Itararé Group; (4) as a Pennsylvanian age is assumed for the Itararé Group,

the macro-charcoal remains described here are probably the first unequivocal macroscopic evidence for palaeo-wildfire for the Carboniferous of Gondwana.

Acknowledgements

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brazil (CAPES) – Finance Code 001; J.R.W. Benicio acknowledges CAPES/PROSUC for doctoral fellowship; A. Jasper acknowledges CAPES (Brazil – 8107-14-9), CNPq (Brazil – 444330/2014-3; 19305436/2015-5) and Alexander von Humboldt Foundation (Germany BRA 1137359 STPCAPES).

References

- Bowmann, D.M.J.S., Balch, J.K., Artaxo, P., Bond, W.J., Carlson, J.M., Cochrane, M.A., D'Antonio, C.M., Defries, R.S., Doyle, J.C., Harrison, S.P., Johnston, F.H., Keeley, J.E., Krawchuk, M.A., Kull, C.A., Marston, J.B., Moritz, M.A., Prentice, I.C., Roos, C.I., Scott, A.C., Swetnam, T.W., van der Werf, G.R., Pyne, S.J., 2009. Fire in the Earth system. *Science*, 324, 481–484. DOI:10.1126/science.1163886.
- Cagliari, J., Lavina, E.L.C, Philipp, R.P., Tognoli, F.M.W., Basei, M.A.S., Faccini, U.F., 2014. New Sakmarian ages for the Rio Bonito formation (Paraná Basin, southern Brazil) based on LA-ICP-MS U–Pb radiometric dating of zircons crystals. *Journal of South American Earth Sciences*, 56, 265–277. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.09.013>.
- Cagliari, J., Philipp, R.P., Buso, V.V., Netto, R.G., Hillebrand, P.K., Da Cunha Lopes, R., Basei, M.A.S, Faccini, U.F., 2016. Age constraints of the glaciation in the Paraná Basin: evidence from new U–Pb dates. *Journal of the Geological Society*, 173(6), 871–874. <https://doi.org/10.1144/jgs2015-161>.
- Cunningham, C.R., Feldman, H.R., Franseen, E.K., Gastaldo, R.A., Mapes, G., Maples, C.G., Schultze, H.P., 1993. The Upper Carboniferous Hamilton Fossil- Lagerstätte in Kansas: a

valley- fill, tidally influenced deposit. *Lethaia*, 26(3), 225–236.

<https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.1993.tb01524.x>.

Degani-Schmidt, I., Guerra-Sommer, M., de Oliveira Mendonça, J., Mendonça Filho, J. G., Jasper, A., Cazzulo-Klepzig, M., Iannuzzi, R., 2015. Charcoalified logs as evidence of hypautochthonous/autochthonous wildfire events in a peat-forming environment from the Permian of southern Paraná Basin (Brazil). *International Journal of Coal Geology*, 146, 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.05.002>.

Diessel, C.F.K., 2010. The stratigraphic distribution of inertinite. *International Journal of Coal Geology*, 81, 251–268. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.04.004>.

El Atfy, H., Havlik, P., Krüger, P.S., Manfroi, J., Jasper, A., Uhl, D., *in press*. Pre Quaternary wood decay ‘caught in the act’ by fire - examples of plant-microbe-interactions preserved in charcoal from clastic sediments. *Historical Biology*. 1–10. <https://doi.org/10.1080/08912963.2017.1413101>.

Falcon-Lang, H.J., 1999. Fire ecology of a late Carboniferous floodplain, Joggins, Nova Scotia. *Journal of the Geological Society*, 156(1), 137–148. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.156.1.0137>.

Falcon-Lang, H.J., 2000. Fire ecology of the Carboniferous tropical zone. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164(1–4), 339–355. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00193-0](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00193-0).

Glasspool, I.J., Edwards, D., Axe, L., 2004. Charcoal in the Silurian as evidence for the earliest wildfire. *Geology*, 32, 381–383. <https://doi.org/10.1130/G20363.1>.

Glasspool, I.J., Scott, A.C., Waltham, D., Pronina, N.V., Shao, L., 2015. The impact of fire on the Late Paleozoic Earth system. *Frontiers in Plant Science*, 6, 756. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00756>.

- Griffis, N.P., Mundil, R., Montañez, I.P., Isabell, J., Fedorchuk, N., Vesely, F., Iannuzzi, R., Yin, Q., 2018. A new stratigraphic framework built on U-Pb single-zircon TIMS ages and implications for the timing of the penultimate icehouse (Paraná Basin, Brazil), *Bulletin*, 130 (5–6), 848–858. <https://doi.org/10.1130/B31775.1>.
- Jasper, A., Uhl, D., Guerra-Sommer, M., Bernardes-de-Oliveira, M.E.C., Machado, N.T.G., 2011. Upper Paleozoic charcoal remains from South America: multiple evidences of fire events in the coal bearing strata of the Paraná Basin, Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 306(3–4), 205–218. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2011.04.022>.
- Jasper, A., Guerra-Sommer, M., Hamad, A.M.A., Bamford, M., Bernardes-de-Oliveira, M.E.C., Tewari, R., Uhl, D., 2013. The burning of Gondwana: Permian fires on the southern continent—a palaeobotanical approach. *Gondwana Research*, 24(1), 148–160. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.08.017>.
- Jasper, A., Uhl, D., Tewari, R., Guerra-Sommer, M., Spiekermann, R., Manfroi, J., Osterkamp, I.C., Benício, J.R.W., Bernardes-de-Oliveira, M.E.C., Pires, E.F., Da Rosa, Á.A.S., 2016. Incêndios vegetacionais Indo-Brasileiros no Neopaleozoico: uma revisão dos registros de carvão vegetal macroscópico. *Geologia USP. Série Científica*, 16(4), 87–97. <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v16i4p87-97>.
- Jasper, A., Agnihotri, D., Tewari, R., Spiekermann, R., Pires, E.F., Da Rosa, Á.A.S., Uhl, D., 2017. Fires in the mire: Repeated fire events in Early Permian ‘peat forming’ vegetation of India. *Geological Journal*, 52(6), 955–969. <https://doi.org/10.1002/gj.2860>.
- Jones, T.P., Chaloner, W.G., 1991. Fossil charcoal, its recognition and palaeoatmospheric significance. *Global and Planetary Change* 5(1–2), 39–50. [https://doi.org/10.1016/0921-8181\(91\)90125-G](https://doi.org/10.1016/0921-8181(91)90125-G).

- Manfroi, J., Jasper, A., Guerra-Sommer, M., Uhl, D., 2012. Sub-arborescent lycophytes in coal bearing strata from the Artinskian (Early Permian/Cisuralian) of the Santa Catarina coalfield (Paraná Basin, SC, Brazil). *Revista Brasileira Paleontologia*, 15, 135–140. <https://www.researchgate.net/publication/233853931>
- Mendonça Filho, J.G., Sommer, M.G., Klepzig, M.C., Mendonça, J.O., Silva, T.F., Kern, M.L., Menezes, T.R., Jasper, A., Silva, M.C., Santos, L.G.C., 2013. Permian carbonaceous rocks from the Bonito Coalfield, Santa Catarina, Brazil: organic facies approaches. *International Journal of Coal Geology*, 111, 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.07.008>.
- Milani, E.J., Faccini U.F., Scherer, C.M.S., Araújo, L.M., Cupertino, J.A., 1998. Sequences and stratigraphy hierarchy of the Paraná Basin (Ordovician to Cretaceous). *Boletim do Instituto de Geociências/USP*, 29, 125–173. <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2316-8986.v29i0p125-173>.
- Milani, E.J., Melo, J.H.G., Souza, P.A., Fernandes, L.A., França, A.B., 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 15(2), 265–287.
- Nichols, G., Jones, T., 1992. Fusain in Carboniferous shallow marine sediments, Donegal, Ireland: the sedimentological effects of wildfire. *Sedimentology*, 39(3), 487–502. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1992.tb02129.x>.
- Nichols, G.J., Cripps, J.A., Collinson, M.E., Scott, A.C., 2000. Experiments in waterlogging and sedimentology of charcoal: results and implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164(1–4), 43–56. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00174-7](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00174-7).
- Pausas, J.G., Keeley, J.E., 2009. A burning story: the role of fire in the history of life. *BioScience*, 59(7), 593–601. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.7.10>.

- Rocha-Campos A.C., Dos Santos, P.R., Fielding, C.R., 2008. Late Paleozoic glacial deposits of Brazil: Paraná Basin. In: Fielding C, Frank TD, Isbell JL (eds) Resolving the late Paleozoic ice age in time and space. GSA Spec, 441–97–114. DOI:org/10.1130/2008.2441(07).
- Scott, A.C., 1989. Observations on the nature and origin of fusain. *International Journal of Coal Geology*, 12(1–4), 443–475. [https://doi.org/10.1016/0166-5162\(89\)90061-X](https://doi.org/10.1016/0166-5162(89)90061-X).
- Scott, A.C., 2000. The Pre-Quaternary history of fire. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164 (1–4), 281–329. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00192-9](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00192-9).
- Scott, A.C., 2010. Charcoal recognition, taphonomy and uses in palaeoenvironmental analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 291(1–2), 11–39. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.12.012>.
- Scott, A.C., Glasspool, I.J., 2006. The diversification of Paleozoic fire systems and fluctuations in atmospheric oxygen concentration. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(29), 10861–10865. <https://doi.org/10.1073/pnas.0604090103>.
- Scott, A.C., Jones, T.P., 1994. The nature and influence of fire in Carboniferous ecosystems. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 106(1–4), 91–112. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(94\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0031-0182(94)90005-1).
- Scott, A.C., Kenig, F., Plotnick, R.E., Glasspool, I.J., Chaloner, W.G., Eble, C.F., 2010. Evidence of multiple late Bashkirian to early Moscovian (Pennsylvanian) fire events preserved in contemporaneous cave fills. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 291(1–2), 72–84. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.06.008>.
- Uhl, D., Jasper, A., Schweigert, G., 2012. Charcoal in the Late Jurassic (Kimmeridgian) of Western and Central Europe - palaeoclimatic and palaeoenvironmental significance. *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, 92(3), 329–341. <https://doi.org/10.1007/s12549-012-0072-x>.

- Uhl, D., Kerp, H., 2003. Wildfires in the Late Palaeozoic of Central Europe - The Zechstein (Upper Permian) of NW-Hesse (Germany). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 199(1–2), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00482-6](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00482-6).
- Uhl, D., Lausberg, S., Noll, R., Stapf, K.R.G., 2004. Wildfires in the Late Palaeozoic of Central Europe - an overview of the Rotliegend (Upper Carboniferous-Lower Permian) of the Saar-Nahe Basin (SW-Germany). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 207(1–2), 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.01.019>.
- Uhl, D., Montenari, M., 2011. Charcoal as evidence of palaeo- wildfires in the Late Triassic of SW Germany. *Geological Journal*, 46(1), 34–41. <https://doi.org/10.1002/gj.1229>.

Figure captions

Figure 1. Location and profile of the Barrocada outcrop; (a) map showing the geographical location of the Barrocada outcrop; (b) lithostratigraphic profile of the Barrocada outcrop. Adapted from Cagliari et al., (2014).

Figure 2. Macro-charcoal remains from the Itararé Group. (a) small macro-charcoal fragment in medium-grey siltstone (white arrow); (b) tracheids bearing circular pitting (white arrow); (c and d) homogenized cell walls (white arrow); (d and e) shoot-like holes which might have been produced by fungal hyphae activity; (f) detail of the shoot-like holes (yellow arrow).

Figure 1

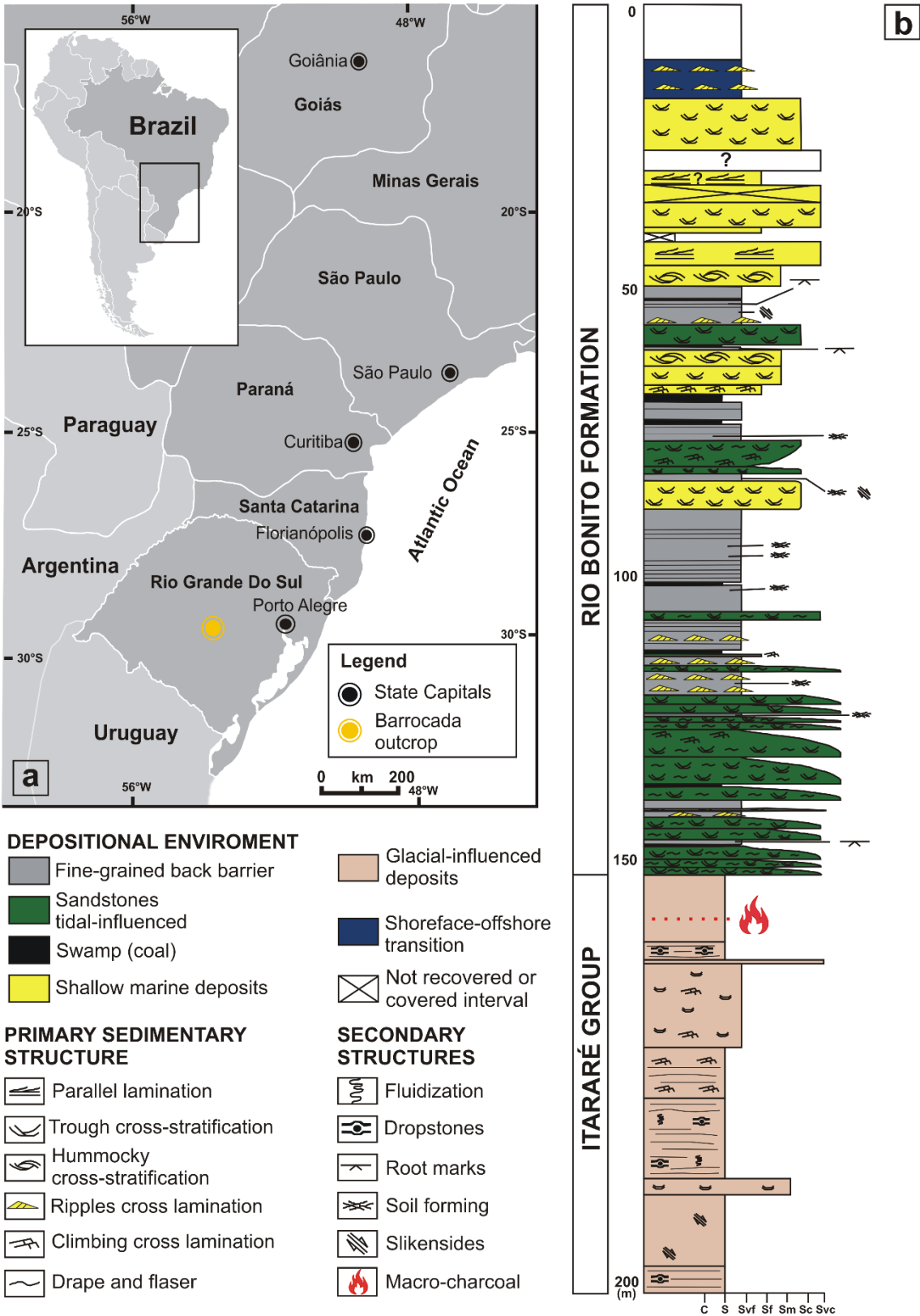
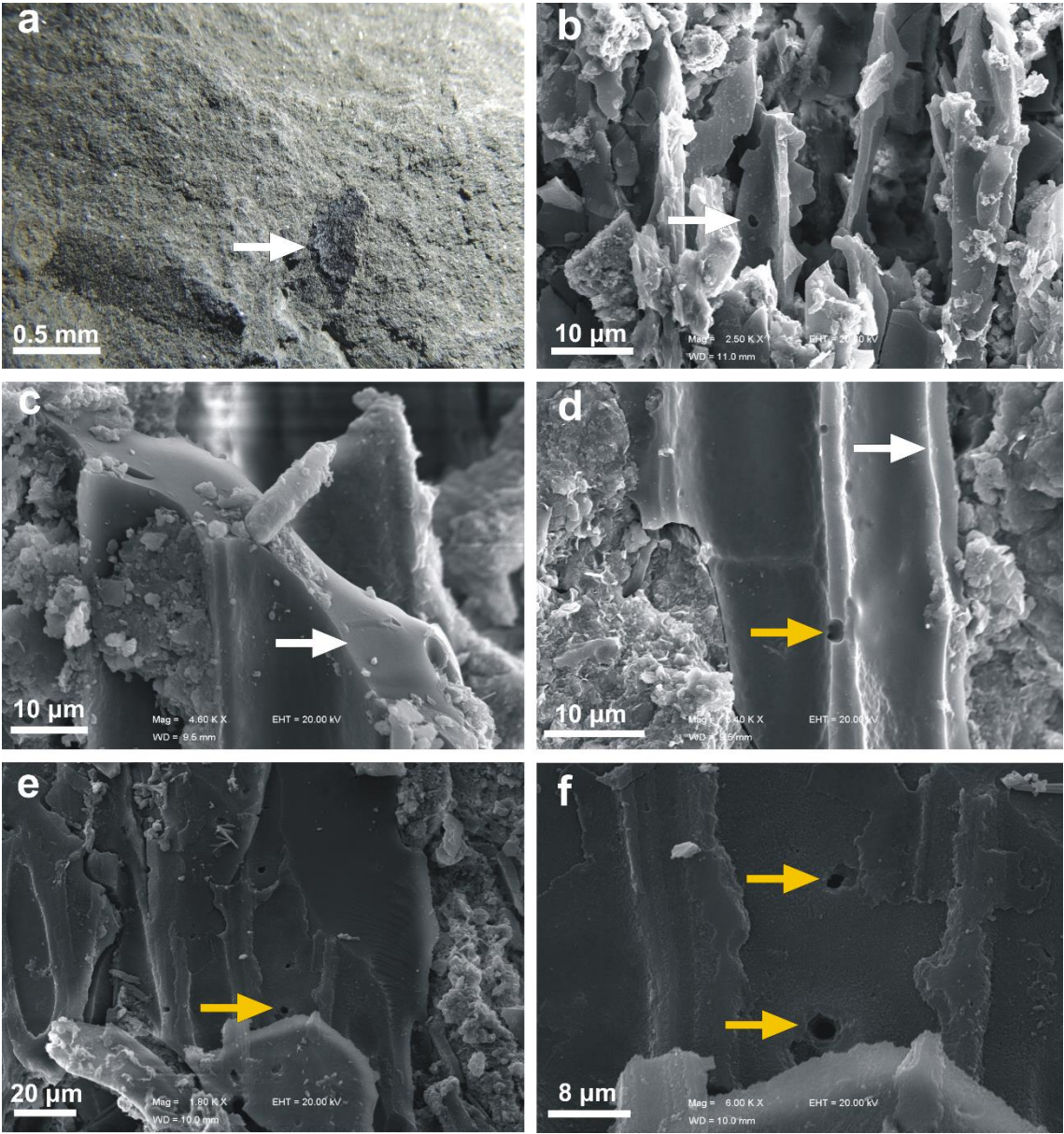
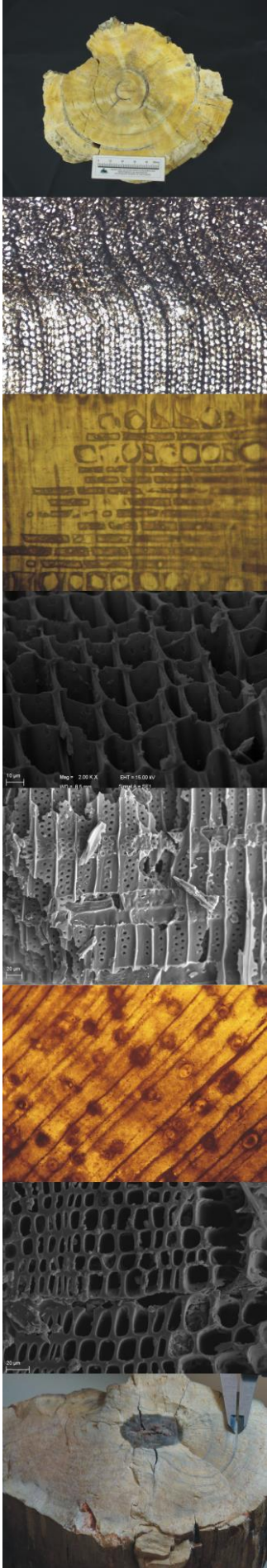


Figure 2





CAPÍTULO 6

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a finalidade de compreender os efeitos e os impactos das ações vinculadas ao intitulado “desenvolvimento humano” sobre o meio ambiente, é necessário levar em consideração a premissa de que os sistemas não são imutáveis e, portanto, estão sujeitos a variações naturais. O entendimento destas dinâmicas passa, invariavelmente, pela análise de suas características e por avaliações de base, vinculadas aos vários ambientes. À vista disto, as pesquisas a respeito dos biomas terrestres têm se retornado cada vez mais importantes para se compreender os processos ambientais envolvidos na sua formação, conservação e equilíbrio. Da mesma forma, observa-se que ocorre uma progressiva expansão de interesse para discussões que buscam esclarecer a evolução dos múltiplos ambientes ao longo do tempo geológico, nos diferentes regimes globais.

O entendimento dos processos ligados às mudanças ambientais ocorridas durante o tempo profundo é fundamental para a compreensão da evolução do planeta. Para tanto, é necessária a integração de múltiplas áreas do conhecimento, a fim de embasar a reconstrução de cenários paleoambientais confiáveis que possam auxiliar como ferramentas preditivas (ROYER et al., 2001). As oscilações climáticas globais são um exemplo que podemos utilizar para construção de abordagens integradas e sistêmicas dos ambientes atuais e pretéritos (LOMBARDO, 1994; TARDY, 1997). As causas destas flutuações nos paleoambientes, por exemplo, são exclusivamente de origem natural, viabilizando uma abordagem crítica e comparativa dos meios observados na atualidade (TARDY, 1997).

Um período de grande interesse para o estudo da interação entre clima e vegetação, é o Permiano [entre \pm 298 e 252 milhões de anos atrás (GASTALDO et al., 1996; RETALLACK, 2013). Conforme Gastaldo et al., (1996), este é o único período da história da Terra que experimentou uma mudança climática global comparável àquela que a Terra poderá experimentar em um futuro próximo. Os autores alegam que, por mais que as plantas do Paleozoico Superior e a geografia da desse período foram completamente diferentes dos padrões atuais, os *taxa*, a sua distribuição geográfica e a natureza das mudanças dessa vegetação podem servir

como base para a compreensão dos eventos de transição global *icehouse-greenhouse*.

Posto isso, a presente tese buscou algumas destas respostas por meio de análises baseadas em características preservadas em lenhos permineralizados e carbonizados da Bacia do Paraná e Parnaíba relacionados a diferentes idades para o Gondwana.

A análise quantitativa e qualitativa do crescimento de xilema secundário de lenhos atuais e fósseis podem fornecer informações de alta resolução sobre os ambientes atuais e pretéritos. O crescimento da madeira é influenciado por uma gama de fatores abióticos e bióticos, entre os quais o clima tem um papel chave (e.g. GERARDS et al. 2007; SCHWEINGRUBER, 1996; FALCON-LANG, 2000; BRISON et al., 2001).

A partir disso, com o objetivo de avaliar as características do crescimento arbóreo de plantas lenhosas da Bacia do Parnaíba, no trabalho de Benício et al., (2016a), foram estudados 32 lenhos gimnospérmicos fósseis da Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional; destes, um total de 682 incrementos de crescimento foram analisados usando padrões de sensibilidade média e anual, para determinar a influência climática no crescimento destes lenhos. Os resultados obtidos a partir destas análises permitiram o estabelecimento de zonas de crescimento preservadas nos lenhos gimnospérmicos. Estas zonas de crescimento foram provavelmente causadas por condições climáticas, ou seja, períodos de alta precipitação alternados com períodos de seca, de paleoambientes semiárido

Por meio das análises microscópicas dos lenhos fósseis do Tocantins, foi possível observar que há uma ausência clara de transição entre o lenho inicial e tardio em todos os espécimes estudados, estes dados confirmam os resultados obtidos por Pires et al., (2011), e, segundo Schweingruber (1996), tal padrão de crescimento é tipicamente característico de árvores que crescem em regiões áridas

Quanto as correlações dos resultados de natureza geológicas/paleontológicas obtidos por Benicio et al., (2016a), demonstrou-se que eles suportam interpretações litológicas de um clima semiárido a árido durante a deposição da Formação Motuca, propostos por trabalhos publicados anteriormente (e.g. LIMA; LEITE, 1978; PINTO;

SAD, 1986; GÓES; FEIJÓ 1994; MATYSOVÁ et al., 2010). Além disso, essa interpretação é reforçada pelo fato de os lenhos estudados serem permineralizados, processo esse que geralmente envolve períodos com alta taxa evaporação (TAVARES E ROHN 2009; MATYSOVÁ et al., 2010; TAVARES 2012).

Portanto, os resultados obtidos por Benicio et al., (2016a) demonstraram que é possível correlacionar padrões de crescimento em lenhos fósseis permineralizados com as variações climáticas vigentes durante o ciclo de vida das plantas.

No Cenozoico do Rio Grande do Sul, lenhos fósseis atribuídos à Formação Touro Passo, são conhecidos há mais de duas décadas (BOLZON et al., 1991, BOLZON, 1997, 1999; PIRES; DA ROSA, 2000, BOLZON; MARCHIORI, 2002). Entretanto, esses gêneros fósseis são inválidos, uma vez que suas descrições ainda não foram publicadas na literatura científica.

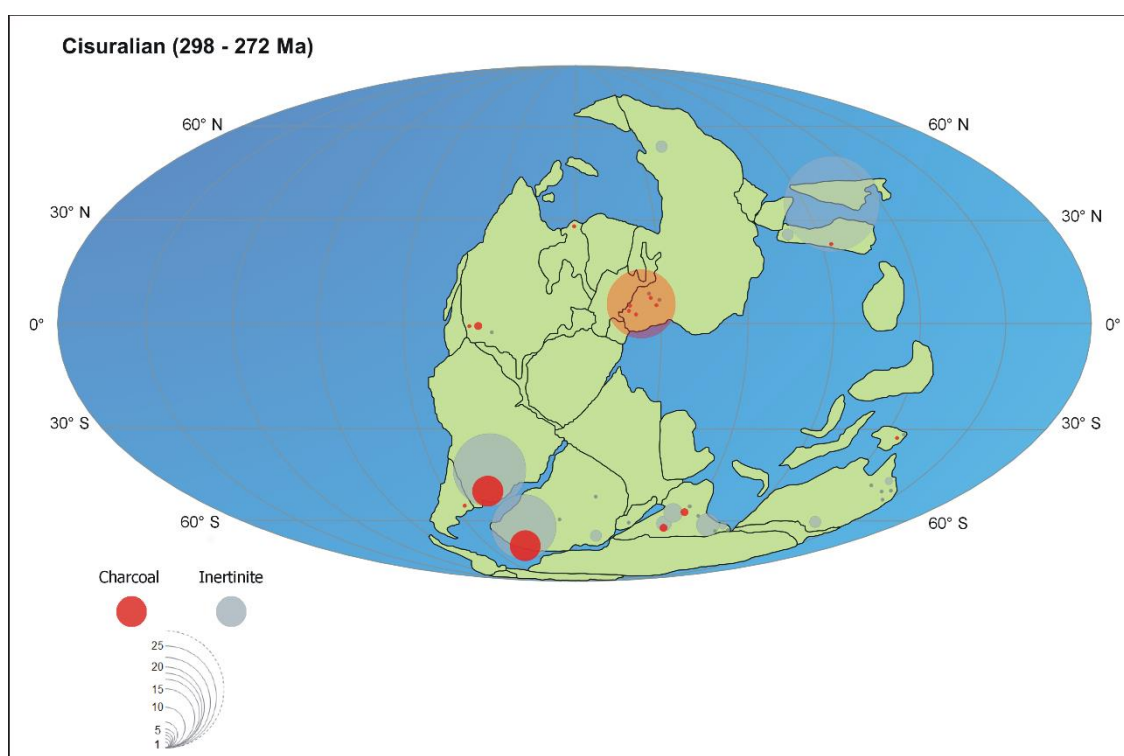
Com o intuito de estabelecer afinidades taxonômicas e padrões gerais e específicos (xilotipos) para lenhos, Benicio et al., (2016b) investigaram um fragmento lenhoso permineralizado pertencente a Formação Touro Passo (Plioceno-Pleistoceno) do Rio Grande do Sul. Com base em um conjunto de análises dos caracteres celulares preservados, um novo fossil-taxon foi descrito para a subfamília Mimosoideae. O fossil-taxon proposto foi nomeado de *Itaquixylon heterogenum*, por diferir de todos os lenhos anteriormente estudados para essa unidade litoestratigráficas (BOLZON, 1991, 1997, 1999). Em relação aos processos de fossilização do fragmento estudado, este corrobora com observações feitas por Buurman (1972) e Mussa e Coimbra (1984), que concluíram que o grau de preservação de estruturas celulares em lenhos opalizados é maior que em espécimes preservados sob estruturas microcristalinos de quartzo.

Este fragmento lenhoso coletado estava incorporado a um conglomerado de depósitos de sistemas de alta energia, com floema e córtex externo ausentes. Com base nisso, considerou-se que o fragmento sofreu transporte antes da deposição final. A presença de incrementos de crescimento bem definidos sugeriu que o *Itaquixylon heterogenum* provavelmente cresceu em um ambiente com acentuada sazonalidade (SCHWEINGRUBER, 1996). No entanto, considerando que apenas um único fragmento fóssil foi coletado e estudado, e sob condições deposicionais alóctones, não foi possível inferir padrões palaeoclimáticos mais precisos. Entretanto, esta

descrição amplia os registros de lenhos fósseis descritos por Bolzon (1991,1999) para a formação Touro Passo (Plioceno-Pleistoceno) do Rio Grande do Sul.

Apesar de publicações prévias sobre o *macro-charcoal* e inertinitas para o Gondwana da Bacia do Paraná (e.g. JASPER et al., 2011, 2013, 2016; MENDONÇA-FILHO et al., 2013; DEGANI-SCHMIDT et al., 2015; MANFROI et al., 2015), existe uma lacuna de análises paleobotânicas acerca destes eventos para o paleocontinente durante alguns intervalos geológicos. Isto pode estar relacionado à necessidade da análise integrada de dados, além da descoberta de novos registros de *macro-charcoal* e inertinitas. Reconstruções paleoambientais clássicas propostas para o paleocontinente estão, em sua maioria, baseadas exclusivamente em análises petrográficas, ficando evidente a lacuna de estudos paleobotânicos, como é o caso do Cisuraliano do Gondwana (Figura 7).

Figura 7. Distribuição das descrições de ocorrência de paleoincêndios vegetacionais durante o Permiano do Gondwana (Cisuraliano).



Fonte:

(Benício et al., *submetido*, a).

Benicio et al., (*submetido*, a), analisaram fragmentos de *macro-charcoal*/inertinitas para seis níveis do afloramento Porongos, norte da Bacia do Paraná. Isto demonstra que os paleoincêndios eram eventos recorrentes nesta bacia sedimentar durante Permiano Inferior. Os dados de refletância indicaram paleoincêndios de baixas temperaturas, que provavelmente ocorriam mesmo em ambientes húmidos formadores de turfeiras, e que possivelmente estavam vinculados aos altos teores de O₂ paleoatmosféricos. Além disso, uma afinidade taxonômica com o padrão do tipo *Agathoxylon* foi sugerida com base nas análises anatômicas dos fragmentos carbonizados. A variação não significativa da anatomia da madeira indica que as gimnospermas foram um dos componentes mais importantes da biomassa responsável pela manutenção destes paleoincêndios vegetacionais recorrentes para o Permiano inferior da bacia do Paraná

Considerando que o fogo depende de condições ambientais adequadas para que a queima ocorra, é possível afirmar que existiam condições necessárias para a ocorrência de paleoincêndios para o Grupo Itararé como fonte de ignição, biomassa e níveis adequados de oxigênio estavam disponíveis durante a deposição sedimentar desta unidade litoestratigráfica (BENICIO et al., (*submetido*, b). Estes novos dados ampliam o panorama de paleoincêndios vegetacionais para Gondwana, visto que descrições detalhadas ainda não foram documentadas para esta unidade geológica. Considerando que o Pensilvaniano é marcado por uma glaciação e deglaciação, entender as dinâmicas do fogo para este período, é uma importante contribuição adicionando mais informações acerca da dinâmica do fogo nos paleoambientes ao longo do tempo

Desta forma, a utilização de *macro-charcoal* como *proxy* para a definição de características paleoambientais se constitui em uma ferramenta extremamente útil, servindo ainda de suporte para inferências acerca da composição da paleoatmosfera e da existência de fontes de ignição (e.g. vulcanismo, descargas elétricas) (JONES, CHALONER, 1991; GLASSPOOL e SCOTT, 2010; GLASSPOOL et al., 2015; BAKER et al., 2017). Além disso, a correlação com informações de cunho geológico, permitem inferir condições paleoambientais confiáveis das condições paleoatmosféricas e paleoclimáticas vigentes dos sistemas em que esses registros foram preservados (e.g. SCOTT, GLASSPOOL, 2006; MACDONALD et al., 1991; ABU HAMAD et al., 2012). Portanto, o estudo da anatomia de lenhos ou mesmo de qualquer registro fóssil

vegetal, como os descritos por Uhl et al., (2016), independente de sua idade e localização, constitui-se em ferramenta de grande valor para a definição dos parâmetros paleoambientais.

CONCLUSÕES

Seguem as principais conclusões, obtidas a partir da integração dos resultados:

► As principais conclusões advindas do estudo dos lenhos fósseis gimnospérmicos da Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional (FPTS) são:

Pôde-se confirmar que o método de sensibilidade média e anual podem ser usados para análises de lenhos fósseis com formação de zonas de crescimentos.

A formação de zonas de crescimento foi provavelmente causada por condições climáticas, em períodos de precipitação aperiódicos, intercalados com um período de restrição hídrica, em um paleoambientes de clima semiárido.

Os dados dendrológicos obtidos foram congruentes com modelos palaeoclimáticos previamente estabelecidos por estudos anteriores para o Permiano da (FPTS), com um clima de monções caracterizado por marcada sazonalidade, e chuvas aperiódicas com períodos marcadamente secos.

► A principal conclusão obtida com a investigação do fragmento fóssil permineralizados pertencente a Formação Touro passo, do Rio Grande do Sul foi:

O lenho fóssil descrito como *Itaquixylon heterogenum*, adiciona mais um fossil-taxon a Subfamília Mimosoideae (Fabaceae), e corrobora na ampliação de registros para essa Subfamília no Plioceno-Pleistoceno do Rio Grande do Sul.

► As principais conclusões alcançadas com as investigações de fragmentos fósseis carbonizados de *macro-charcoal*/inertinita, para o Gondwana da Bacia do paraná de Santa Catarina e Rio Grande do Sul foram:

A presença de *macro-charcoal* dos seis níveis de carvão investigados do afloramento Porongos, fornecem a primeira evidência da ocorrência de recorrentes paleoincêndios vegetacionais durante os depósitos da camada de carvão Barro Branco.

Estes paleoincêndios vegetacionais recorrentes estão provavelmente relacionados às altas concentrações de O₂ paleoatmosféricos, propostas para o Permiano Inferior do Gondwana.

Os fragmentos de *macro-charcoal* foram transportados dentro do sistema deposicional através do fluxo hidráulico, esse transporte pode ter resultado em uma tendência seletiva em favor de restos de madeira carbonizada. No entanto, o transporte eólico poderia ter atuado no transporte de pequenas partículas de *macro-charcoal* (inertinitas) dentro da área fonte.

Uma origem para autóctones para os fragmentos carbonizados do afloramento Porongos é sugerida e, portanto, esses recorrentes eventos ocorreram nas proximidades dos ambientes formadores de turfa da Camada Barro Branco.

As análises detalhadas dos *macro-charcoal* para indicaram um padrão anatômico do tipo *Agathoxylon*. A variação não significativa da anatomia da madeira sugere que essas plantas gimnospérmicas com xilema secundário do tipo *Agathoxylon* foram um dos componentes mais importantes da biomassa responsável pela manutenção destes paleoincêndios vegetacionais recorrentes.

A confirmação da presença de *macro-charcoal* preservados nos depósitos do Grupo Itararé, do afloramento da Barrocada fornecem a primeira evidência detalhada de paleoincêndios vegetacionais durante a deposição desta unidade litoestratigráfica.

Os fragmentos carbonizados descritos para o Grupo Itararé sugerem que provavelmente foram transportados antes da deposição final, e que condições necessárias para a ocorrência de paleoincêndios, estavam disponíveis durante a deposição.

Se uma idade Pensilvaniano for suportada para os depósitos do Grupo Itararé, os fragmentos aqui descritos são provavelmente, a primeira evidência detalhada de *macro-charcoal* para o Carbonífero do Gondwana.

REFERÊNCIAS

- ABU HAMAD, A. M. B.; JASPER, A.; UHL, D. The record of Triassic charcoal and other evidence for palaeo-wildfires: signal for atmospheric oxygen levels, taphonomic bias or lack of fuel? **International Journal of Coal Geology**, v. 96-97, p. 60–71, 2012.
- BAKER, S. J., HESSELBO, S. P., LENTON, T. M., DUARTE, L. V., BELCHER, C. M. Charcoal evidence that rising atmospheric oxygen terminated Early Jurassic ocean anoxia. **Nature Communications**, v. 8, p. 15018, 2017.
- BENÍCIO, J. R. W., SPIEKERMANN, R., MANFROI, J., UHL, D., PIRES, E. F., Jasper, A. Palaeoclimatic inferences based on dendrological patterns of permineralized wood from the Permian of the Northern Tocantins Petrified Forest, Parnaíba Basin, Brazil. **Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments**, v. 96(2), p. 255–264, 2016a.
- BENÍCIO, J. R. W.; PIRES, E. F.; DA, R., STOCK, Á. A.; SPIEKERMANN, R.; UHL, D.; JASPER, A. A new fossil fabaceae wood from the Pleistocene Touro Passo Formation of Rio Grande do Sul, Brazil. **Acta Musei Nationalis Pragae**, Series B-Historia Naturalis, v. 72, 2016b.
- BENÍCIO, J. R. W.; JASPER, A.; SPIEKERMANN, R.; ROCKENBACH, C. I.; CAGLIARI, J.; PIRES, E. F.; UHL, D. Recurrent palaeo-wildfire events in Barro Branco coal seam, Rio Bonito Formation, lower Permian of Paraná Basin, Santa Catarina State, Brazil. (**Submetido, a**).
- BENÍCIO, J. R. W.; JASPER, A.; SPIEKERMANN, R.; ROCKENBACH, C. I.; CAGLIARI, J.; PIRES, E. F.; UHL, D. The first evidence of palaeo-wildfire from the Itararé Group, southernmost portion of the Paraná Basin, Brazil. (**Submetido, b**).
- BRISON, A.L.; PHILIPPE, M.; THÉVENARD, F. Are Mesozoic wood growth rings climate induced? **Paleobiology**, v. 27, p. 531–538 2001.
- BUURMAN, P. Mineralization of fossil wood. **Scripta Geologica**, v.12, p.1–43, 1972.
- BOLZON, R., MARCHIORI, J., ALVES, L., GUERRA-SOMMER, M. Madeira de Angiospermae fóssil (Terciário) da região de Uruguaiana, Rio Grande do Sul: análise preliminar. **Congresso Brasileiro De Paleontologia**, v. 12, p. 65, 1991.
- BOLZON, R. T. Caules Silicificados de Angiospermas (Terciário) da Região de Uruguaiana, Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Universidade de Guarulhos**, v. 2 p. 237–237, 1997.
- BOLZON, R. T. **Lenhos de Dicotyledoneae do Cenozóico da Região de Uruguaiana, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil**. Tese de doutorado, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 199 pp, 1999.

BOLZON, R. T.; MARCHIORI, J. N. C. A vegetação no sul da América–Perspectiva paleoflorística. **Ciência e Ambiente**, v. 24, p. 5–24, 2002.

COIMBRA, A. M.; MUSSA, D. Associação Lignitaeflorística na Formação Pedra-de-Fogo, (Arenito Cacunda), Bacia do Maranhão–Piauí, Brasil. **Anais Congresso Brasileiro de Geologia**, p.591-6-5, 1984.

DEGANI-SCHMIDT, I.; GUERRA-SOMMER, M.; MENDONÇA, J. O.; MENDONÇA FILHO, J. G.; JASPER, A.; CAZZULO-KLEPZIG, M.; IANNUZZI, R. Charcoalified logs as evidence of hypautochthonous/autochthonous wildfire events in a peat-forming environment from the Permian of southern Paraná Basin (Brazil). **International Journal of Coal Geology**, v. 146, p. 55–67, 2015.

FALCON-LANG, H. J. A Method to Distinguish Between Woods Produced By Evergreen and Deciduous Coniferopsids On The Basis Of Growth Ring Anatomy: A New Tool. **Palaeontology**, v. 4 n. 43, p. 785–793, 2000.

GASTALDO, R. A.; DIMICHELE, W. A.; PREFFERKORN, H. W. Out of the icehouse into the greenhouse: a late Paleozoic analog for modern global vegetational change. **GSA Today**, v. 6, p. 1–7, 1996.

GLASSPOOL, I. J.; SCOTT, A. C. Phanerozoic concentrations of atmospheric oxygen reconstructed from sedimentary charcoal. **Nature Geosciences**, v. 3, p. 627–630, 2010.

GERARDS, T., DAMBLON, F., WAUTHOZ, B., GERRIENNE, P., Comparison of Cross-field pitting in fresh, dried and charcoalified softwoods. **IAWA Journal**, v. 28, p. 49–60, 2007.

GLASSPOOL, I., SCOTT, A. C., WALTHAM, D., PRONINA, N. V., SHAO, L. The impact of fire on the Late Paleozoic Earth system. **Frontiers in plant science**, v. 6, p. 756, 2015.

JASPER, A.; UHL, D.; GUERRA-SOMMER, M.; ABU HAMAD, A. M. B.; MACHADO, N. T. G. Palaeowildfires in Gondwana: Remains from a tonstein in the Faxinal coalfield, a Lower Permian coal succession in Southern Paraná Basin, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciência**, v. 83, p. 471–481, 2011.

JASPER, A.; GUERRA-SOMMER, M.; HAMAD, A.; ABDALLA, M. B.; BAMFORD, M.; BERNARDES-DE-OLIVEIRA, M.; TEWARI, R.; UHL, D. The burning of Gondwana: Permian fires on the southern continent – A palaeobotanical approach. **Gondwana Research**, v. 24, p. 148–160, 2013.

JASPER, A.; UHL, D.; TEWARI, R.; GUERRA-SOMMER, M.; SPIEKERMANN, R.; MANFROI, J.; OSTERKAMP, I. C.; BENÍCIO, J. R. W.; BERNARDES-DE-OLIVEIRA, M. E.; ETIENE FABBRIN PIRES, E. F.; DA-ROSA, A. A. Incêndios vegetacionais Indo-Brasileiros no Neopaleozoico: uma revisão dos registros de carvão vegetal macroscópico. **Geologia USP. Série Científica**, v. 16, p. 87–97, 2016.

JASPER, A.; AGNIHOTRI, D.; TEWARI, R.; SPIEKERMANN, R.; PIRES, E. F.; DA ROSA, A. S.; UHL, D. Fires in the mire: repeated fire events in Early Permian 'peat forming vegetation of India. **Geological Journal**, v.52, p. 955–969, 2017.

JONES, T. P.; CHALONER, W. G. Fossil charcoal, its recognition and palaeoatmospheric Significance. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology** (Global and Planetary Change Section), v. 97, n.1-2, p. 39–50, 1991.

MACDONALD, G., M.; LARSEN, C. P. S.; SZEICZ, J. M.; MOSER, K, A. The reconstruction of boreal forest fire history from lake sediments-a comparison of charcoal, pollen, sedimentological, and geochemical indexes. **Quat. Sci. Rev.** v. 10, p. 53–71, 1991.

MANFROI, J.; UHL, D.; GUERRA-SOMMER, M.; FRANSCISCHINI, H.; MARTINELLI, A.G.; BENTO SOARES, M.; JASPER, A. Extending the database of Permian palaeo-wildfire on Gondwana: Charcoal remains from the Rio do Rasto Formation (Paraná Basin), Middle Permian, Rio Grande do Sul State, Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 436, p. 77–84, 2015.

MENDONÇA FILHO, J. G., GUERRA-SOMMER, M., KLEPZIG, M. C., MENDONÇA, J. O., SILVA, T. F., KERN, M. L., SANTOS, L. G. C. Permian carbonaceous rocks from the Bonito Coalfield, Santa Catarina, Brazil: organic facies approaches. **International Journal of Coal Geology**, v. 111, p. 23–36, 2013.

MUSSA, D.; COIMBRA, A.M. Método de estudo tafonômico aplicado a lignispécimes permianos da bacia do Paraná. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 56, n.1, p. 85–101, 1984.

MUSSA, D.; COIMBRA, A. M. Novas perspectivas de comparação entre as taofloras permianas (de lenhos) das bacias do Parnaíba e do Paraná. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA**, 10, Rio de Janeiro. Anais., SBP, v.2, p. 901-923, 1987.

PIRES, E. F.; DA ROSA, Á. A. S. Sobre um lenho fóssil de Itaqui, Extremo Oeste do Rio Grande do Sul. **Revista Universidade Guarulhos, Guarulhos**, v. 5, p. 137–140, 2000.

PIRES, E.F.; GUERRA-SOMMER, M.; BARDOLA, T.; VEECK, G.P. Padrões de crescimento em lenhos gimnospérmicos como indicadores paleoclimáticos na Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional (Permiano) Bacia do Parnaíba, Tocantins, Brasil. In: MORAES, F. (Ed.). **Contribuições à Geografia Física do Estado do Tocantins**. Goiânia: Kelps, p. 113–134, 2011.

RETALLACK, G. J. Ediacaran Gaskiers glaciation of Newfoundland reconsidered. **Journal of the Geological Society**, v. 170, n. 1, p. 19-36, 2013.

ROYER, D. L., WING, S. L., Beerling, D. J., JOLLEY, D. W., KOCH, P. L., HICKEY, L. J., BERNER, R. A. Paleobotanical evidence for near present-day levels of atmospheric CO₂ during part of the Tertiary. **Science**, v. 292, n. 5525, p. 2310–2313, 2001.

SCHWEINGRUBER, F.H. Tree rings and environment dendroecology. Swiss Federal Institute for Forest. **Snow and Landscape Research**, Stuttgart. 1996.

SCOTT, A. C., GLASSPOOL, I. J. The diversification of Paleozoic fire systems and fluctuations in atmospheric oxygen concentration. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 103, n. 29, p. 10861–10865, 2006.

TARDY, Y. Geoquímica Global: oscilações climáticas e evolução do meio ambiente desde quatro bilhões de anos. **Estudos avançados**, v. 11, n. 30, p. 149–173, 1997.

TAVARES, T. M. V; ROHN, R. First record of petrified Permian pectopterids from the Paraná Basin, Brazil (Corumbataí Formation, Passa Dois Group, northeastern State of São Paulo): morphology, anatomy and paleoecological implications. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 27, n. 1, p. 60–73, 2009.

TAVARES, T.M.V. **Estudos de Marattiales da “Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional” (Permiano, Bacia do Parnaíba)**. Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 185 f., 2012.

TAVARES, T.M.V.; ROHN, R.; RÖßLER, R.; FENG, Z.; NOLL, R. Petrified Marattiales pinnae from the Lower Permian of North-Western Gondwana (Parnaíba Basin, Brazil). **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 201, p. 12–28, 2014.

UHL, D., JASPER, A., VALERIUS, T., MANFROI, J., GUERRA-SOMMER, M., RICARDI-BRANCO, F. S. *Hepaticites iporangae* Ricardi-Branco, Faria, Jasper, and Guerra-Sommer, 2011 from the early Permian of the Paraná Basin, Brazil, is not a liverwort but a tracheophyte. **Journal of Paleontology**, v. 90, n. 4, p. 632–639, 2016.

ANEXOS

ANEXO A – Artigo publicado em coautoria (2016)

INDO-BRAZILIAN LATE PALAEOZOIC WILDFIRES: AN OVERVIEW ON
MACROSCOPIC CHARCOAL

DISPONIVEM EM: (DOI: [10.11606/issn.2316-9095.v16i4p87-97](https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v16i4p87-97))

Indo-Brazilian Late Palaeozoic wildfires: an overview on macroscopic charcoal

*Incêndios vegetacionais Indo-Brasileiros no Neopaleozoico: uma revisão dos registros de
carvão vegetal macroscópico*

André Jasper^{1,2,3}, Dieter Uhl^{1,2,3}, Rajni Tewari⁴, Margot Guerra-Sommer⁵, Rafael Spiekermann¹,
Joseline Manfroi^{1,2}, Isa Carla Osterkamp^{1,2}, José Rafael Wanderley Benício^{1,2},

Mary Elizabeth Cerruti Bernardes-de-Oliveira⁶, Etienne Fabbrin Pires⁷ and Átila Augusto Stock da Rosa⁸

¹Centro Universitário UNIVATES, Museu de Ciências Naturais, Setor de Paleobotânica e Evolução de Biomas,
Avenida Avelino Tallini, 171, CEP 9590000, Lajeado, RS, Brazil (ajasper@univates.br; rspiekermann@univates.br;
joselinemanfroi@universo.univates.br; isacarla@universo.univates.br; jose.benicio@univates.br)

²Centro Universitário UNIVATES, Programa de Pós-graduação em Ambiente e Desenvolvimento, Lajeado, RS, Brazil

³Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum, Frankfurt am Main, Hesse, Germany (dieter.uhl@senckenberg.de)

⁴Birbal Sahni Institute of Paleosciences, Lucknow, Uttar Pradesh, India (rajni_tewari@bsip.res.in)

⁵Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, Brazil (margot.sommer@ufrgs.br)

⁶Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, SP, Brazil (maryeliz@usp.br)

⁷Universidade Federal do Tocantins - UFT, Porto Nacional, TO, Brazil (etienefabbrin@mail.uft.edu.br)

⁸Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, RS, Brazil (atila@smail.ufsm.br)

Received on April 1st, 2016; accepted on September 22nd, 2016

Abstract

Sedimentary charcoal is widely accepted as a direct indicator for the occurrence of paleo-wildfires and, in Upper Paleozoic sediments of Euramerica and Cathaysia, reports on such remains are relatively common and (regionally and stratigraphically) more or less homogeneously distributed. On the contrary, just a few reliable records have been published for the Late Paleozoic of Gondwana and only recently it has been demonstrated that macroscopic charcoals (and thus fires) were also common in the southern continent during this period. The most important Gondwanan records are predominantly charred gymnosperm woods mainly related to coal bearing strata. Late Paleozoic macro-charcoal occurs in both, the Damodar Basin (India) and the Paraná Basin (Brazil), demonstrating that paleo-wildfires were spread out in different sequences and distinct stratigraphic intervals during this period in Gondwana. Based on the so far published records as well as new samples from the Seam-VI coalfield, Raniganj Formation (Damodar Basin – Lopingian of India), an overview of the Late Paleozoic Indo-Brazilia

ANEXO B – Artigo publicado em coautoria (2016)

EVIDENCE OF WILDFIRES IN THE LATE PERMIAN (CHANGSINGHIAN)

ZEWAN FORMATION OF KASHMIR, INDIA

DISPONÍVEL EM: ([DOI: 10.18520/cs/v110/i3/414-419](https://doi.org/10.18520/cs/v110/i3/414-419))

Evidence of wildfires in the Late Permian (Changsinghian) Zewan Formation of Kashmir, India

André Jasper^{1,2,*}, Dieter Uhl^{1,2,3}, Deepa Agnihotri⁴, Rajni Tewari⁴, Sundeep K. Pandita⁵, José Rafael Wanderley Benicio¹, Etienne Fabbrin Pires⁶, Átila Augusto Stock Da Rosa⁷, Gulam D. Bhat⁸ and S. Suresh K. Pillai⁴

¹Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento, PPGAD. Centro Universitário Univates, Lajeado, Brazil

²Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum, Frankfurt am Main, Germany

³Senckenberg Centre for Human Evolution and Palaeoenvironment, Institut für Geowissenschaften, Universität Tübingen, Tübingen, Germany

⁴Birbal Sahni Institute of Palaeobotany, 53 University Road, Lucknow 226 007, India

⁵Department of Geology, University of Jammu, Jammu 180 006, India

⁶Universidade Federal do Tocantins, Porto Nacional, Brazil

⁷Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brazil

⁸Directorate of Geology and Mining, Jammu and Kashmir Government, Srinagar 190 002, India

The first record of palaeo-wildfire evidence in the form of charcoal is documented from the Late Permian Zewan Formation of the Kashmir region, northwest Himalaya. This evidence is in the form of fragments of tracheids that show homogenized cell walls, a characteristic feature of charcoal. Considering that palaeo-wildfire studies provide important palaeoecological information, the present study is significant, as it allows reconstructing new information about environmental conditions during the deposition of the sediments of the Late Permian Zewan Formation.

Keywords: Charcoal, Gondwana, Himalayan region, Late Palaeozoic, marine environment.

THE Tethyan realm has been globally accepted as a hub for geoscientific studies, and Kashmir – a part of north west Himalayan region, in particular, has been considerably explored for its wealth of data on various geoscientific aspects including stratigraphy, geochemistry and palaeontology of its Carboniferous, Permian and Triassic sediments¹. However, palaeo-wildfire studies have so far never been carried out for this area. Although numerous Late Palaeozoic palaeo-wildfire

ANEXO C – Artigo publicado em coautoria (2018)

A REMARKABLE MASS-ASSEMBLAGE OF LYCOPSID REMAINS FROM THE RIO BONITO FORMATION, LOWER PERMIAN OF THE PARANÁ BASIN, RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL

DISPONÍVEL EM: ([DOI:10.1007/s12549-018-0318-3](https://doi.org/10.1007/s12549-018-0318-3))




Palaeobio Palaeoenv (2018) 98:369–384
<https://doi.org/10.1007/s12549-018-0318-3>

SENCKENBERG

ORIGINAL PAPER

A remarkable mass-assemblage of lycopsid remains from the Rio Bonito Formation, lower Permian of the Paraná Basin, Rio Grande do Sul, Brazil

Rafael Spiekermann¹ & Dieter Uhl^{1,2} & José Rafael Wanderley Benício¹ & Margot Guerra-Sommer³ & André Jasper^{1,2} 

Received: 15 September 2017 / Revised: 30 November 2017 / Accepted: 25 January 2018 / Published online: 2 March 2018
Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung and Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2018

Abstract Arborescent and sub-arborescent lycopsids are important floristic elements of the Brazilian early Permian post-glacial environments. However, the taxonomy and systematic position as well as the biology and ecology of these plants are poorly understood. The present study describes a remarkable assemblage of *Brasilodendron* cf. *pedroanum* axes preserved in the plant bearing sub-level N8b of the Morro do Papaléo outcrop, Rio Bonito Formation, early Permian of the Paraná Basin, Rio Grande do Sul state, Brazil. These axes are massively concentrated, without any preferential depositional orientation, forming a monotypical assemblage. They are unbranched and preserved as impressions. Three morphological patterns, occurring on distinct axes, were described for leaf cushions. This mass-assemblage is probably a result of allochthonous deposition and hydraulic size-sorting. The massive concentration of *B. cf. pedroanum* suggests that this fossil taxon was an important floristic element somewhere in the upstream area of the braided river system studied here..

Electronic supplementary material The online version of this article (<https://doi.org/10.1007/s12549-018-0318-3>) contains supplementary material, which is available to authorized users.

* André Jasper
ajasper@univasf.br

¹ Universidade do Vale do Taquari – Univates, Lajeado, Rio Grande do Sul, Brazil

² Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum, Frankfurt am Main, Germany

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil

Keywords Glossopteris flora Western Gondwana

lycopsids *Brasilodendron pedroanum* Leaf cushion

morphology Morro do Papaléo outcrop

ANEXO D – Resumo expandido publicado (2015)

ANÁLISE DENDROLÓGICA QUALITATIVA EM LENHOS GIMNOSPÉRMICOS FÓSSEIS DA FLORESTA PETRIFICADA DO TOCANTINS SETENTRIONAL

XVI Encontro de Botânicos
do Rio Grande do Sul

VIII Encontro Estadual de Herbários

A Botânica na Contemporaneidade

de 30/09/15 a 02/10/15



ISBN 978-85-7892-093-7

ANÁLISE DENDROLÓGICA QUALITATIVA EM LENHOS GIMNOSPÉRMICOS FÓSSEIS DA FLORESTA PETRIFICADA DO TOCANTINS SETENTRIONAL, PERMIANO DA BACIA DO PARNAÍBA

José R. W. Benício¹; Rafael Spiekermann²; Joseline Manfroi³; Etienne F. Pires⁴; Dieter Uhl⁵; André Jasper⁶.

Resumo

O crescimento lenhoso é influenciado por uma gama de fatores bióticos e abióticos, dentre os quais o clima é um fator chave. Desta forma, análises quantitativas e qualitativas de lenhos fósseis são uma importante ferramenta para a compreensão dos padrões climáticos pretéritos. Considerando tal premissa, uma área de destaque para estudos paleoclimáticos baseados em padrões de crescimento lenhoso é a Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional (FPTS). Esta floresta é citada na literatura científica como uma das mais importantes associações lignoflorísticas de paleobioma subtropical do Hemisfério Sul. Parte desta floresta encontra-se preservada no Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins (MNAFTO), uma unidade de conservação integral, localizada na porção setentrional do estado brasileiro do Tocantins. Geologicamente, esta floresta petrificada encontra-se inserida na Bacia do Parnaíba, e os lenhos estudados no presente trabalho estão associados a Formação Motuca, cuja idade inferida é permiana. À vista disto, o presente estudo pretende inferir aspectos paleoclimáticos regionais durante o Permiano, por meio de dados *proxy* obtidos de análises de lenhos fósseis de origem gimnospérmica, preservados na FPTS. O material analisado corresponde a 32 fragmentos de lenhos oriundos de nove pontos de coleta localizados dentro e no entorno da unidade de conservação. Visando determinar a influência climática sob o crescimento lenhoso, foram confeccionadas lâminas petrográficas e os detalhes anatômicos dos incrementos de crescimento foram investigados qualitativamente. Os resultados da investigação anatômica permitiram estabelecer a presença de zonas de crescimento nos lenhos gimnospérmicos. Estas zonas de crescimento provavelmente se originaram em um paleoambiente semiárido com precipitações aperiódicas. Tal inferência coaduna com reconstruções paleoclimáticas prévias para a FPTS. Além disso os fragmentos fósseis coletados fora da área do MNAFTO demonstram que esta unidade de conservação não está contemplando todo o potencial fossilífero desta floresta petrificada.

Palavras-chave: Gondwana, Dendrologia, Zonas de crescimento

¹ Bolsista de Doutorado Capes do Programa de Pós-graduação em Ambiente e Desenvolvimento, Centro Universitário Univates, Avenida Avelino Tallini, nº 171, Bairro Universitário. CEP 95900-000 Lajeado, Rio Grande do Sul, Brazil, jose.benicio@univates.br.

² Bolsista de Iniciação Científica CNPq, Centro Universitário Univates, Avenida Avelino Tallini, nº 171, Bairro Universitário. CEP 95900-000 Lajeado, Rio Grande do Sul, Brazil,

³ Bolsista de Doutorado Capes, Programa de Pós-graduação em Ambiente e Desenvolvimento, Centro Universitário Univates, Avenida Avelino Tallini, nº 171, Bairro Universitário. CEP 95900-000 Lajeado, Rio Grande do Sul, Brazil.

⁴ Professor Adjunto, Universidade Federal do Tocantins. Rua 07, quadra 15, s/nº, Jardim dos Ipês. CEP 77500-000 Porto Nacional, Tocantins, Brazil.

⁵ Pesquisador Visitante, Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum, Senckenberganlage 25, 60325 Frankfurt am Main, Germany.

⁶ Professor Titular, Centro Universitário Univates. Avenida Avelino Tallini, nº 171, Bairro Universitário. CEP 95900-000 Lajeado, Rio Grande do Sul, Brazil, ajasper@univates.br



Paleoincêndios vegetacionais no Permiano Inferior do Gondwana: uma ferramenta para a compreensão da evolução dos incêndios naturais atuais.

Rafael Spiekermann^[1]

André Jasper^[2]

Dieter Uhl^[3]

José Rafael Wanderley Benício^[4]

Joseline Manfroi^[5]

O fogo é uma expressão da vida na Terra, sendo que é esta que produz o oxigênio e os hidrocarbonetos necessários para a combustão. Este elemento age com diferente intensidade e frequência em diversos ecossistemas desde o advento das plantas vasculares, sendo um fator chave na evolução dos biomas terrestres. Embora humanos sempre conviveram com o fogo, a ubiquidade de incêndios vegetacionais incontroláveis durante as últimas décadas revelaram nosso limitado conhecimento científico sobre tal fenômeno. Esta lacuna científica pode acarretar em sérios riscos futuros, uma vez que modelos quantitativos apontam que um aumento na temperatura, relacionado as mudanças climáticas globais, pode mudar dramaticamente a frequência dos incêndios vegetacionais naturais. Considerando esta postulação, o interesse no entendimento da ecologia do fogo tem aumentado e diversos estudos relacionados a incêndios vegetacionais vem sendo desenvolvidos. Entretanto, para o pleno entendimento desta dinâmica é necessário compreender a ação do fogo ao longo da história da Terra. À vista disto, uma importante época geológica que deve ser considerada para o estudo da ecologia do fogo é o Permiano Inferior, sendo que este experimentou uma transição climática similar a qual a Terra em breve poderá experimentar. Desta forma, visando compreender o cenário dos paleoincêndios vegetacionais no Permiano Inferior gondwanico, uma criteriosa revisão bibliográfica incluindo carvão vegetal macroscópico e inertinitas, proxies para o estudo dos paleoincêndios vegetacionais, foi realizada. Por meio desta revisão foi possível observar um drástico aumento dos paleoincêndios vegetacionais em diferentes partes do Gondwana durante esta época geológica. Considerando o elevado nível de oxigênio atmosférico e a existência de vegetação propensa ao fogo durante todo o Permiano Inferior, este aumento de paleoincêndios pode estar associado a elevação de temperatura global. Entretanto, em contraste a estudos de incêndios vegetacionais atuais, o estudo dos paleoincêndios depende do registro fóssil, o qual contém hiatos. Estes hiatos podem estar relacionados a questões tafonômicas ou a falta de pesquisas na área. Desta forma, para reconstruir o panorama dos paleoincêndios vegetacionais durante o Permiano Inferior, mais pesquisas e novos registros destes eventos são necessários.

Palavras-chaves: Carvão vegetal macroscópico. Inertinitas. Paleozoico superior.

ANEXO F – Resumo publicado em coautoria (2015)

*SUCCESSIVE PALAEOWILDFIRES EVENTS IN RIO BONITO FORMATION LEVELS,
LOWER PERMIAN, PARANÁ BASIN*



7th German-Brazilian Symposium for Sustainable Development

04. - 10. October 2015



Interaction between Earth resources and processes and human societies

Heidelberg University, German

Successive Palaeowildfires events in Rio Bonito Formation levels, Lower Permian, Paraná Basin

Manfroi, J¹; Spiekermann, R¹; Benício, J.R.W¹; Guerra-Sommer, M²; Uhl, D³; Jasper, A¹

1: Centro Universitário Univates, Museu de Ciências Naturais, Setor de Botânica e Paleobotânica Lajeado, Brazil, joselinemanfroi@universo.univates.br

2: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, Brazil

3: Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum e Senckenberg Center for Human Evolution and Palaeoenvironment, Institut für Geowissenschaften, Universität Tübingen, Frankfurt, Germany

Integrated studies of paleontological and faciological nature, focused on the Quitéria outcrop, Rio Bonito Formation - Paraná Basin, Rio Grande do Sul, Brazil, has been generating significant data for the understanding of the development and deployment process of the wet biomes in the Lower Permian of Gondwana. The outcropping section of the Quitéria outcrop is characterized by two depositional intervals, which represent different conditions of a dynamic coastal system. The basal interval, from light gray to dark gray in color, contains significant amounts of organic matter and is characterized by fine levels of coal and carbonaceous shales. In contrast, the top interval, yellowish in color, is characterized by clastic sediments and presents a singular fitofossil assemblage preserved in a roof-shale level. It is inferred that an episodic deposit, associated with a washover system, reconfigured the morphology of the depositional system, generating the relatively abrupt gradation of a peatland system to a sandy soils poor in nutrients system. In previous studies related to the organic-rich interval of the outcrop, the occurrence of macroscopic charcoal was described. However this occurrence was restricted to only one of the outcropping facies. Despite the relevance of previous studies to confirm definitively the occurrence of Palaeowildfires in the Lower Permian of the Paraná Basin, in recent detailed analyses of the outcropping section, macroscopic charcoal fragments were found in all exposed levels, including the roof-shale. In this way, this new data allow to infer that, differently to what was thought until now, the palaeowildfires events in Quitéria outcrop depositional system were successive, reaching constant and recurrently the peats and surrounding areas during the Lower Permian.

ANEXO G – Resumo publicado em coautoria (2015)

CONHECENDO O SETOR DE BOTÂNICA E PALEOBOTÂNICA DO MUSEU
DE CIÊNCIAS NATURAIS DA UNIVATES, LAJEADO-RS, BRASIL

ANAIS DA

XVII MEEP

MOSTRA DE ENSINO, EXTENSÃO E PESQUISA



Anais da XVII MEEP

Mostra de Ensino, Extensão e Pesquisa

Comissão Organizadora:

Viviane Maria T. Eckhardt – Coordenadora da Extensão Universitária;
Luís César de Castro – Representantes da Câmara de Extensão;
Lydia Christmann Espindola Koetz – Representante da Câmara de Pesquisa e Pós-Graduação;
Jamile Weizenmann – Representante da Câmara de Ensino;

Coordenação:

Maria Madalena Dullius – Pró-Reitora de Pesquisa, Extensão e Pós-Graduação;

Equipe Técnica

Débora Juchum – Secretária de Extensão;

Promoção

Centro Universitário UNIVATES

Pró-Reitoria de Pesquisa, Extensão e Pós-Graduação

Pró-Reitoria de Ensino

Ficha catalográfica:

Catálogo na publicação – Biblioteca da Univates

M916a

Mostra de Ensino, Extensão e Pesquisa (17: 2015: Lajeado, RS)
Anais da XVII Mostra de Ensino, Extensão e Pesquisa. - Lajeado:
Ed. da Univates, 2015.

389 p.

e-book

ISSN 1981-9099

1. Pesquisa científica - Univates 2. Metodologia da pesquisa
I. Título

CDU: 001.891:061.3

Centro Universitário UNIVATES

Reitor: Prof. Me. Ney José Lazzari

Vice-Reitor e Presidente da Fuvates: Prof. Dr. Carlos Cândido da Silva Cyrne

Pró-Reitora de Pesquisa, Extensão e Pós-Graduação: Profa. Dra. Maria Madalena Dullius

Pró-Reitora de Ensino: Profa. Ma. Luciana Carvalho Fernandes

Pró-Reitora de Desenvolvimento Institucional: Profa. Dra. Júlia Elisabete Barden

Pró-Reitor Administrativo: Prof. Me. Oto Roberto Moerschbaeher

Rua Avelino Tallini, 171 - Cx. Postal 155 - CEP 95900-000 - Lajeado - RS - Brasil

Fone/Fax: (51) 3714-7000 - Ligação gratuita: 0800 7070809

E-mail: linhadireta@univates.br

Site: <http://www.univates.br>

Editora Univates

Coordenação: Ivete Maria Hammes

Editoração: Glauber Röhrig e Marlon Alceu Cristófoli

Fone: (51) 3714-7024

E-mail: editora@univates.br

Site: <http://www.univates.br/editora>

Modalidade: EXTENSÃO

Área de conhecimento: Ciências Biológicas

Autor(es): Jéssica Meneghini, Thaís Zeferino Laux, Rafael Spiekermann, Talyssa Valerius, Angélica Sulzbach, José Rafael Wanderlei Benício, Rosane Pereira da Silva, Joseline Manfro, Marjorie Kaufmann, Isa Carla Osterkamp, Mariela Inês Secchi, André Jasper

Apresentador(es): Jéssica Meneghini, Thaís Zeferino Laux

Orientador(a): André Jasper

CONHECENDO O SETOR DE BOTÂNICA E PALEOBOTÂNICA DO MUSEU DE CIÊNCIAS NATURAIS DA UNIVATES, LAJEADO-RS, BRASIL

Resumo: Criado em 1995, o Setor de Botânica e Paleobotânica do Museu de Ciências Naturais da UNIVATES (SBP/MCN/UNIVATES) integra coleções didáticas e científicas de fósseis. O acervo didático, com 930 exemplares, objetiva suprir demandas específicas e agregar valor educativo às aulas práticas dos cursos de Ciências Biológicas da UNIVATES, enquanto o acervo científico, com 1380 amostras atualmente, alberga material proveniente de diferentes bacias sedimentares. Além de atender os cursos de graduação e o PPGAD/UNIVATES, a estrutura disponibilizada e as coleções suportam os projetos relacionados à paleoecologia e permitem a atuação de pesquisadores e bolsistas. O principal foco das pesquisas realizadas no SBP/MCN/UNIVATES é o estudo de carvão vegetal (charcoal) macroscópico como indicativo direto da ocorrência de paleoincêndios vegetacionais. Além disso, o setor tem como objetivo ampliar parcerias, incrementar acervos e atuar em novas ações de investigação científica. O setor possui vínculos com outras instituições de ensino superior e institutos de pesquisa nacionais e internacionais, viabilizando inserções na comunidade científica. O SBP/MCN/UNIVATES cumpre as exigências de um núcleo de pesquisa em paleobotânica, permitindo tanto o estudo do patrimônio fitofossilífero e a sua salvaguarda, quanto à formação de recursos humanos especializados. Os investimentos refletem o grande número de pesquisadores já formados e em formação dentro das áreas de interesse do setor. Mesmo em processo de consolidação, seu principal objetivo - contribuir de forma significativa com a pesquisa paleobotânica em seus diferentes níveis - vem sendo cumprido. Como consequência, espera-se constante crescimento e ampliação dos objetos de estudo.

Palavras-chave: Acervo didático e científico. Amostras significativas. Ampliação de estudos em paleontologia. Colaboração entre institutos de pesquisa. SBP/MCN/UNIVATES.

Instituição: Centro Universitário UNIVATES

Financiador: Centro Universitário UNIVATES

ANEXO H – Resumo publicado (2015)

*LENHOS GIMNOSPÉRMICOS FÓSSEIS COMO PROXY PARA INFERÊNCIAS
PALEOCLIMÁTICAS DA FLORESTA PETRIFICADA DO TOCANTINS
SETENTRIONAL, PERMIANO DA BACIA DO PARNAÍBA, BRASIL*

Modalidade: PESQUISA

Área de conhecimento: Ciências Biológicas

Autor(es): José Rafael Wanderley Benício, Rafael Spiekermann, Joseline Manfroi, Dieter Uhl, Etienne Fabbrin Pires, André Jasper

Apresentador(es): José Rafael Wanderley Benício, Rafael Spiekermann

Orientador(a): André Jasper

LENHOS GIMNOSPÉRMICOS FÓSSEIS COMO PROXY PARA INFERÊNCIAS PALEOCLIMÁTICAS DA FLORESTA PETRIFICADA DO TOCANTINS SETENTRIONAL, PERMIANO DA BACIA DO PARNAÍBA, BRASIL

Resumo: O crescimento lenhoso é influenciado por uma gama de fatores bióticos e abióticos, dentre os quais o clima é um fator chave. Desta forma, análises quantitativas e qualitativas de lenhos fósseis são uma importante ferramenta para a compreensão dos padrões climáticos pretéritos. Considerando tal premissa, uma área de destaque para estudos paleoclimáticos baseados em padrões de crescimento lenhoso é a Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional. Esta floresta é citada na literatura científica como uma das mais importantes associações lignoflorísticas de paleobioma subtropical do Hemisfério Sul. Parte desta floresta encontra-se preservada no Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins, uma unidade de conservação integral, localizada na porção setentrional do estado brasileiro do Tocantins. Geologicamente, esta floresta petrificada encontra-se inserida na Bacia do Parnaíba, e os lenhos estudados no presente trabalho estão associados a Formação Motuca, cuja idade inferida é permiana. À vista disto, o presente estudo pretende inferir aspectos paleoclimáticos regionais durante o Permiano, por meio de dados proxy obtidos de análises de lenhos gimnospérmicos fósseis preservados na Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional. O material analisado corresponde a 32 fragmentos de lenhos fósseis oriundos de nove pontos de coleta localizados dentro e no entorno da unidade de preservação. Visando a determinar a influência climática sob o crescimento lenhoso, 682 incrementos de crescimento foram investigados em seção plana, e dados quantitativos foram obtidos através do cálculo de sensibilidade média e sensibilidade anual, oriundos deste material. Além disso, lâminas petrográficas foram feitas e os detalhes anatômicos dos incrementos de crescimento dos lenhos foram investigados qualitativamente. Os resultados obtidos por meio das análises estatísticas demonstraram que estas plantas eram sensíveis e cresciam em um ambiente oscilante. Além disso, os resultados da investigação anatômica permitiram estabelecer a presença de zonas de crescimento nos lenhos gimnospérmicos fósseis. Análises detalhadas destas zonas de crescimento, associadas aos resultados estatísticos, permitiram a reconstrução de um clima semiárido com regime de monções, onde períodos de grande precipitação eram sucedidos por severas secas. Esta inferência coaduna com reconstruções paleoclimáticas prévias para a Floresta Petrificada do Tocantins.

Palavras-chave: Dendrologia. Paleoclimatologia. Paleozoico Superior. Gondwana. Gimnospermas.

Instituição: Centro Universitário UNIVATES, Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum, Universidade Federal do Tocantins

Financiador: Capes; CNPq; Fapergs; Univates

ANEXO I – Resumo publicado (2015)

INFERÊNCIAS PALEOCLIMÁTICAS BASEADAS EM ANÁLISES DE
CRESCIMENTO LENHOSO DE GIMNOSPERMAS DA FLORESTA
PETRIFICADA DO TOCANTINS SETENTRIONAL, PERMIANO, BACIA DO
PARNAÍBA: RESULTADOS PRELIMINARES



Paleontologia em Destaque

formativo da SBP

Ano 30, nº 68, 2015 · ISSN 1807-2550

RESUMOS

SOCIEDADE BRASILEIRA DE PALEONTOLOGIA

Presidente: Dr. Max Cardoso Langer (USP/Ribeirão Preto)

Vice-Presidente: Dr. Átila Augusto Stock da Rosa (UFMS)

1º Secretário: Dr. Renato Pirani Ghilardi (UNESP)

2ª Secretária: Dra. Mírian L. A. Forancelli Pacheco (UFSCar/Sorocaba)

1ª Tesoureira: Dra. Annie Schmaltz Hsiou (USP/Ribeirão Preto)

2º Tesoureiro: Dr. Rodrigo Miloni Santucci (UnB/Planaltina)

Diretor de Publicações: Dr. Juan Carlos Cisneros(UFPI)



Paleontologia em Destaque

Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Paleontologia

Ano 30, n° 68, Outubro/2015 · ISSN 1807-2550

Web: <http://www.sbpbrasil.org/>, Editor: Juan Carlos Cisneros

Capa: Formação Solimões, Mioceno Superior, Acre; foto: Annie Hsiou.

1. Paleontologia 2. Paleobiologia 3. Geociências

Distribuído sob a [Licença de Atribuição Creative Commons](#).



INFERÊNCIAS PALEOCLIMÁTICAS BASEADAS EM ANÁLISES DE CRESCIMENTO LENHOSO DE GIMNOSPERMAS DA FLORESTA PETRIFICADA DO TOCANTINS SETENTRIONAL, PERMIANO, BACIA DO PARNAÍBA: RESULTADOS PRELIMINARES

JOSÉ RAFAEL WANDERLEY BENÍCIO^{1,2}, TALYSSA VALERIUS¹, ETIENE FABBRIN PIRES², ANDRÉ JASPER¹

¹Setor de Botânica e Paleobotânica, Museu de Ciências Naturais, Centro Universitário UNIVATES; ²Laboratório de Paleobiologia, Universidade Federal do Tocantins.

jose.benicio@universo.univates.br, tvalerius@universo.univates.br, etienefabbrin@uft.edu.br, ajasper@univates.br

A Floresta Petrificada de Tocantins Setentrional (FPTS) é citada na literatura científica como uma das mais importantes associações lignoflorísticas permianas de paleobioma Temperado Quente no Hemisfério Sul. Esta floresta está em partes preservadas pelo Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins (MNAFTO), uma unidade de preservação integral localizada a nordeste do Estado do Tocantins. Geologicamente, o Monumento está inserido na Bacia do Parnaíba, sendo que os afloramentos são atribuídos à Formação Motuca, de idade Permiano Superior. Os objetivos deste trabalho foram: apresentar novos afloramentos fossilíferos para a área do Monumento e entorno, e estabelecer a influência dos processos climáticos ocorridos durante o Permiano com a utilização de dados *proxy* obtidos através da análise de elementos vegetacionais preservados na FPTS. O material analisado correspondeu a 32 fragmentos de lenhos gimnospérmicos provenientes de nove pontos de coleta de cinco diferentes fazendas localizadas dentro da área do parque. Foram feitas sessões planas e lâminas petrográficas, para fins de determinação de padrões climáticos com base no crescimento do lenho, através da Sensibilidade Média e Sensibilidade Anual. Dos pontos amostrados, quatro são considerados pontos inéditos de coleta, que aumenta a área de incidência dos fósseis na região, contribuindo assim para o mapeamento da ocorrência dos mesmos. Com relação às análises de crescimento arbóreo, os dados estatísticos foram obtidos de um total de 682 incrementos de crescimento observados dentre os espécimes analisados. Os resultados preliminares apontam que a sensibilidade média variou de 0.367 a 1.475, sendo que a média foi de 0.778. O valor mínimo de sensibilidade anual é 0.004 e o máximo é 1.749. Todos os espécimes mostram valores considerados sensíveis, que indicam a vigência de um clima de monções caracterizado por marcada sazonalidade, com chuvas fortes em períodos definidos. Durante o período seco, este tipo de clima pode apresentar características típicas de regiões semiáridas.

ANEXO J – Resumo publicado em coautoria (2015)

SUPOSTO ESTRÓBILO DE LICÓFITA DO AFLORAMENTO MORRO
PAPALÉO, FORMAÇÃO RIO BONITO, BACIA DO PARANÁ

Paleontologia em Destaque



PALEO 2015

Súmula dos encontros e

RESUMOS

SOCIEDADE BRASILEIRA DE PALEONTOLOGIA

Presidente: Dr. Max Cardoso Langer (USP/Ribeirão Preto)

Vice-Presidente: Dr. Átila Augusto Stock da Rosa (UFSM)

1º Secretário: Dr. Renato Pirani Ghilardi (UNESP)

2ª Secretária: Dra. Mírian L. A. Forancelli Pacheco (UFSCar/Sorocaba)

1ª Tesoureira: Dra. Annie Schmaltz Hsiou (USP/Ribeirão Preto)

2º Tesoureiro: Dr. Rodrigo Miloni Santucci (UnB/Planaltina)

Diretor de Publicações: Dr. Juan Carlos Cisneros (UFPI)



Paleontologia em Destaque

Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Paleontologia

Ano 31, n° 69, Junho/2016 · ISSN 1807-2550

Web: <http://www.sbpbrasil.org/>, Editor: Juan Carlos Cisneros

Agradecimentos: Valeria Gallo (UERJ), Fabiana Rodrigues Costa Nunes (UNIFESP), Karen Adami Rodrigues (UFPEL), Carolina Zabini (UTFPR)

Capa: Formação Santa Maria (Triássico: Carniano),

Agudo, Rio Grande do Sul; foto: Juan Carlos Cisneros.

1. Paleontologia 2. Paleobiologia 3. Geociências

Distribuído sob a [Licença de Atribuição Creative Commons](#).



SUPOSTO ESTRÓBILO DE LICÓFITA DO AFLORAMENTO MORRO PAPALÉO, FORMAÇÃO RIO BONITO, BACIA DO PARANÁ

R. SPIEKERMANN¹, J. MANFROI¹, J. R. W. BENÍCIO¹, D. UHL², A. JASPER¹

¹Centro Universitário Univates, Setor de Botânica e Paleobotânica, Museu de Ciências Naturais, Avenida Avelino Tallini, nº 171, Bairro Universitário, CEP 95900-000 Lajeado, Rio Grande do Sul, Brasil; ²Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum, Senckenberganlage 25, 60325 Frankfurt am Main, Germany.
rspiekermann@universo.univates.br, joselinemanfroi@universo.univates.br, jose.benicio@universo.univates.br,
dieter.uhl@senckenberg.de, ajasper@univates.br

Embora contemporaneamente representadas por um modesto grupo de plantas herbáceas, as licófitas atingiram formas arborescentes e desempenharam um papel ecológico crucial no Gondwana durante o Permiano Inferior. Entretanto, estudos relacionados a este grupo de plantas na Bacia do Paraná são escassos, permanecendo assim diversas lacunas relacionadas às suas características morfológicas. Considerando tal premissa, uma área de especial interesse para o estudo destas plantas é o afloramento Morro Papaléo, sendo que este preserva sob a forma de impressão, grande quantidade de licófitas relacionadas ao morfogênero *Brasilodendron*. Localizado no município de Mariana Pimentel, este singular afloramento de idade Eopermiana, apresenta a clara delimitação entre o Grupo Itararé e a Formação Rio Bonito. Desta forma, visando contribuir para o conhecimento deste enigmático grupo de plantas, o presente estudo reporta um provável estróbilo de licófitas proveniente do nível 7 do Afloramento Morro Papaléo, Formação Rio Bonito, Permiano Inferior da Bacia do Paraná, Rio Grande do Sul, Brasil. Este fitofóssil é oriundo de coletas realizadas pela equipe do Setor de Botânica e Paleobotânica da Univates e está tombado sob o acrônimo PbUMCN 955A, no acervo paleontológico do Museu de Ciências Naturais da Univates. O fragmento foi analisado sob estereomicroscópio (Zeiss Stemi-2000C) com aumento de 6,5 a 40 vezes e fotografado. Por meio desta análise foi possível observar sua morfologia cônica, assim como escamas levemente sobrepostas. Estas características são marcantes em estróbilos de Lycopodiales. Embora encontrado isolado, tal fragmento está associado a impressões de *Brasilodendron* sp., sendo possível assim inferir suposta relação entre ambos. Entretanto análises mais detalhadas e novas coletas de material são necessárias para suportar tal hipótese. [CNPq]

ANEXO K – Resumo publicado em coautoria (2015)

*SUCCESSIVE PALAEOWILDFIRES EVENTS IN RIO BONITO
FORMATION LEVELS, LOWER PERMIAN, PARANÁ BASIN*

SUCCESSIVE PALAEOWILDFIRES EVENTS IN RIO BONITO FORMATION LEVELS,
LOWER PERMIAN, PARANÁ BASIN

J. MANFROI¹, R. SPIEKERMANN¹, J. R.W BENÍCIO¹, M. GUERRA-SOMMER², D. UHL³, A. JASPER¹

¹Centro Universitário Univates, Museu de Ciências Naturais, Setor de Botânica e Paleobotânica Lajeado, Brazil;

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, Brazil; ³Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum e Senckenberg Center for Human Evolution and Palaeoenvironment, Institut für Geowissenschaften, Universität Tübingen, Frankfurt, Germany.

*joselinemanfroi@universo.univates.br, rspiekermann@univates.br, jose.benicio@universo.univates.br,
margot.sommer@ufrgs.br, dieter.uhl@senckenberg.de, ajasper@univates.br*

Integrated studies of paleontological and faciological nature, focused on the Quitéria outcrop, Rio Bonito Formation - Paraná Basin, Rio Grande do Sul, Brazil, has been generating significant data for the understanding the of the development and deployment process of the wet biomes in the Lower Permian of Gondwana. The outcropping section of the Quitéria outcrop is characterized by two depositional intervals, which represent different conditions of a dynamic coastal system. The basal interval, from light gray to dark gray in color, contains significant amounts of organic matter and is characterized by fine levels of coal and carbonaceous shales. In contrast, the top interval, yellowish in color, is characterized by clastic sediments and presents a singular fitofossil assemblage preserved in a roof-shale level. It is inferred that an episodic deposit, associated with a washover system, reconfigured the morphology of the depositional system, generating the relatively abrupt gradation of a peatland system to a sandy soils poor in nutrients system. In previous studies related to the organic-rich interval of the outcrop, the occurrence of macroscopic charcoal was described. However this occurrence was restricted to only one of the facies cropping out. Despite the relevance of previous studies to confirm definitively the occurrence of Palaeowildfires in the Lower Permian of the Paraná Basin, in recent detailed analyses of the section cropping out, macroscopic charcoal fragments were found in all exposed levels, including the roof-shale. In this way, this new data allow to infer that, differently to what was thought until now, the palaeowildfires events in Quitéria outcrop depositional system were successive, reaching constant and recurrently the peats and surrounding areas during the Lower Permian. [CNPq & Capes]

ANEXO L – Resumo publicado em coautoria (2015)

NOVO REGISTRO FÓSSIL DE MONILÓFITA PARA O
AFLORAMENTO QUITÉRIA, PERMIANO INFERIOR DA BACIA DO
PARANÁ, RIO GRANDE DO SUL, BRASIL

Boletim de Resumos

XXIV Congresso Brasileiro de Paleontologia

PALEONTOLOGIA EM DESTAQUE

EDIÇÃO ESPECIAL



Presidente

Max Cardoso Langer (FFCLRP-USP)

Vice-Presidente

Átila Augusto Stock da Rosa (UFSM)

1º Secretário

Renato Pirani Ghilardi (DCB-FC-UNESP)

2º Secretário

Mírian Liza Alves Forancelli Pacheco (UFSCar)

1ª Tesoureira

Annie Schmaltz Hsiou (FFCLRP-USP)

2º Tesoureiro

Rodrigo Miloni Santucci (UNB)

Diretor de Publicações

Juan Carlos Cisneros Martínez (UFPI)

Congresso Brasileiro de Paleontologia (24º : 2015: Crato, CE)

Boletim de Resumos / Paleontologia em Destaque: boletim informativo da

Sociedade Brasileira de Paleontologia. – Vol. 1, nº 1 (1984). 02 a 06 de

agosto de 2015; editores Douglas Riff, Flaviana Jorge de Lima, Gustavo

Ribeiro de Oliveira, Juliana Manso Sayão, Paula Andrea Sucerquia,

Rafael César Lima Pedroso de Andrade, Renan Alfredo Machado Bantim

– Crato: Universidade Regional do Cariri, 2015. 242p. ; 25 cm.

ISSN 1516-1811

1. Geociências. 2. Paleontologia. 3. Sociedade Brasileira de Paleontologia.

NOVO REGISTRO FÓSSIL DE MONILÓFITA PARA O AFLORAMENTO QUITÉRIA, PERMIANO INFERIOR DA BACIA DO PARANÁ, RIO GRANDE DO SUL, BRASIL

TALYSSA VALERIUS¹, JOSELINE MANFROI^{1,2}, JOSÉ RAFAEL WANDERLEY BENICIO^{1,2}, MARGOT GUERRA-SOMMER⁴, DIETER UHL⁵, ANDRÉ JASPER^{1,2}

¹Setor de Botânica e Paleobotânica do Museu de Ciências Naturais, Centro Universitário UNIVATES, ²Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento, Centro Universitário UNIVATES (PPGAD/UNIVATES), ⁴Instituto de Geociências, UFRGS, ⁵Institut für Geowissenschaften, Universität Tübingen <right> tvalerius@universo.univates.br, joeslinemanfroi@universo.univates.br, jose.benicio@universo.univates.br, margot.sommer@ufrgs.br dieter.uhl@senckenberg.de, ajasper@univates.br.

fósseis a olho nu e sob estereomicroscópico, com re-

O Afloramento Quitéria está localizado no Município de Encruzilhada do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil, com coordenadas geográficas 30°17'S – 52°11'W. É considerado como um dos mais importantes sítios paleontológicos do Permiano da porção sul da Bacia do Paraná. A ocorrência de registros fitofossilíferos únicos, ajuda na compreensão dos processos ocorridos na formação das camadas de carvão do supercontinente? Gondwana durante o Paleozoico Superior. Para as camadas estudadas, já foram descritos fósseis de briófitas (*Hepaticites iporangae*), licófitas sub-arborescentes (*Brasilodendron pedroanum*), licófitas herbáceas (*Lycopodites riograndensis*), pteridospermas (*Botrychiopsis plantiana*) e coníferas (*Cloricladius quiteriensis*). Além disso, o nível basal do afloramento, rico em matéria orgânica, serviu para comprovar a presença de carvão vegetal macroscópico e, consequentemente, a ocorrência de paleoincêndios vegetacionais para o Gondwana durante o Permiano. Todavia, apesar de estar amplamente estudado, foi possível encontrar materiais inéditos em coletas de campo recentemente desenvolvidas. Neste sentido o presente trabalho teve como objetivo identificar impressões foliares provenientes do nível de *roof-shale* do afloramento Quitéria, onde foram coletadas amostras-de-mão que continham impressões de fragmentos foliares diversos, não descritos para a ciência. O material foi depositado na Coleção Paleobotânica do Setor de Botânica e Paleobotânica do Museu de Ciências Naturais da Univates, sob a sigla Pbu (Pbu 254, Pbu 255). Realizou-se a análise dos

apresentação morfológica em câmera-clara. As frondes estudadas constituem-se em folhas compostas, com nervuras principais proeminente na ráquis e nos folíolos. Os folíolos possuem bordos fortemente recortados e estão distribuídos de forma plana e alterna ao longo da ráquis. A impressão possui morfologia que as aproxima das monilófitas, todavia, a ausência de vestígios de epiderme e o reduzido número de exemplares disponíveis, previnem uma associação direta, com este grupo até o momento. Assim, apesar de estar confirmado que se trata de um novo táxon a ser descrito, novas coletas serão realizadas para contemplar uma diagnose completa. [CAPES; CNPq 125153/2014-7; FAPERGS].

ANEXO M – Resumo publicado (2016)

*CARVÃO VEGETAL MACROSCÓPICO EM ESTRATOS DO
PALEOZOICO SUPERIOR DO ESTADO DE SANTA CATARINA,
BRASIL*



Centro Universitário UNIVATES Reitor: Prof. Me. Ney

José Lazzari

Vice-Reitor e Presidente da Fuvates: Prof. Dr. Carlos Cândido da Silva Cyrne

Pró-Reitora de Pesquisa, Extensão e Pós-Graduação: Profa. Dra. Maria Madalena Dullius

Pró-Reitora de Ensino: Profa. Ma. Luciana Carvalho Fernandes

Pró-Reitora de Desenvolvimento Institucional: Profa. Dra. Júlia Elisabete Barden

Pró-Reitor Administrativo: Prof. Me. Oto Roberto Moerschbaeher



Editora Univates

Coordenação e Revisão Final: Ivete Maria Hammes **Editores:** Glauber Röhrig e

Marlon Alceu Cristófoli **Arte:** Marketing e Comunicação -Univates

Conselho Editorial da Editora Univates

Titulares

Adriane Pozzobon

Marli Teresinha Quartieri

Rogério José Schuck

Fernanda Cristina Wiebusch Sindelar

Suplentes

Fernanda Rocha da Trindade

Ieda Maria Giongo

João Miguel Back

Alexandre André Feil

Avelino Tallini, 171 – Bairro Universitário – Lajeado – RS, Brasil

Fone: (51) 3714-7024 / Fone/Fax: (51) 3714-7000

editora@univates.br / <http://www.univates.br/editora>

C749 Congresso de Ciências Biológicas do Vale do Taquari (1. : 2016 : Lajeado, RS)

Anais do I Congresso de Ciências Biológicas do Vale do Taquari, 1º a 06 de setembro de 2016, Lajeado, RS / Claudete Rempel, Mônica Jachetti Maciel (Orgs.) - Lajeado : Ed. da Univates, 2016.

61 p.

ISBN 978-85-8167-176-5

1. Ciências biológicas 2. Anais I. Título

CDU: 57

Catálogo na publicação – Biblioteca da Univates

CARVÃO VEGETAL MACROSCÓPICO EM ESTRATOS DO PALEOZOICO SUPERIOR DO ESTADO DE SANTA CATARINA, BRASIL

José Rafael Wanderley Benício, Rafael Spiekermann, Etienne F. Pires, Dieter Uhl, André Jasper

Introdução: O fogo é uma importante fonte de perturbação em uma variedade de ecossistemas modernos e desempenha um papel chave na evolução dos biomas terrestres. Embora a espécie humana tenha convivido com o fogo desde os seus primórdios, a ocorrência recorrente de incêndios vegetacionais de difícil controle e que geraram prejuízos expressivos durante as últimas décadas, revela o limitado conhecimento do homem acerca deste tipo de fenômeno. Para tornar possível o estudo dos paleoincêndios vegetacionais em diferentes momentos da história da Terra, utiliza-se como ferramenta o carvão vegetal macroscópico (CVM), considerado indicativo direto das ocorrências destes eventos. **Objetivo:** Desta forma, com o intuito de contribuir para a compreensão dos eventos associados à dinâmica ambiental do Permiano, o presente estudo pretende avaliar a ocorrência de paleoincêndios vegetacionais em depósitos de idade Permiana Inferior do estado de Santa Catarina, Formação Rio Bonito, Bacia do Paraná. **Procedimentos metodológicos:** Para tanto, as amostras de rocha coletadas serão submetidas a análises em estereomicroscópio (Zeiss Stemi 2000C) no laboratório do Setor de Botânica e Paleobotânica vinculado ao Museu de Ciências Naturais (Univates). Os fragmentos que apresentarem as características de CVM serão extraídos mecanicamente das rochas com auxílio de pinças e agulhas histológicas e montados sobre *stubs* que serão analisados sob microscópio eletrônico de varredura (Zeiss EVO LS15) disponível no Parque Científico e Tecnológico do Vale do Taquari (TECNOVATES/UNIVATES). **Resultados esperados:** Com base nas imagens obtidas sob MEV, serão definidas as características anatômicas mais relevantes observadas (e.g. morfologia e distribuição dos traqueídeos, grau de conservação/degradação das paredes celulares e presença de outros tipos de tecidos vegetais preservados). Mediante estas análises, pretende-se confirmar a presença de CVM em estratos deposicionais do Permiano Inferior da Bacia do Paraná na região carbonífera do estado de Santa Catarina. Além disto, pretende-se correlacionar os eventos de paleoincêndios ocorridos naquela área durante o Permiano com as condições paleoambientais das áreas de produção de biomassa circundantes. Tais dados permitirão uma melhor compreensão da dinâmica do fogo no Permiano gondwânico, servindo de base para a construção de cenários de evolução paleoambiental e, conseqüentemente, de modelos acerca de eventos futuros relacionados a este tipo de evento.

Palavras-chave: Paleoincêndios. Gondwana. Formação Rio Bonito. Reconstruções paleoambientais.

ISBN 978-85-8167-176-5

ANEXO N – Resumo publicado em coautoria (2016)

*PADRÃO MORFOLÓGICO DE ALMOFADAS FOLIARES DE LICÓFITAS
SUB-ARBORESCENTES DO AFLORAMENTO MORRO DO PAPALÉO,
PERMIANO INFERIOR DA BACIA DO PARANÁ*

PADRÃO MORFOLÓGICO DE ALMOFADAS FOLIARES DE LICÓFITAS SUBARBORESCENTES DO AFLORAMENTO MORRO DO PAPALÉO, PERMIANO INFERIOR DA BACIA DO PARANÁ

Rafael Spiekermann, José Rafael Benício Wanderley, Joseline Manfro, Dieter Uhl, André
Jasper

Introdução: Embora atualmente representadas por um modesto grupo de plantas herbáceas, as licófitas atingiram formas arborescentes e desempenharam um importante papel ecológico durante o Paleozoico. No Gondwana, licófitas arborescentes e subarborescentes colonizaram os ambientes pós-glaciais do Permiano Inferior sendo que diversas morfoespécies foram descritas para este período. Tais descrições taxonômicas baseiam-se especialmente na morfologia de almofadas foliares, que correspondem à porção basal do micrófilo que permanece preservada no caule mesmo após a abscisão foliar. Estas almofadas recobrem os caules destas plantas, fornecendo diversas informações taxonômicas, como presença ou não de cicatriz foliar, feixe vascular, paricnos e lígula. Entretanto, a maioria dos *taxa* de licófitas gondwânicas é descrita com base em fósseis incompletos e mal preservados, sendo desta forma a definição do padrão morfológico das almofadas foliares e, conseqüentemente, a taxonomia destas plantas, uma enigmática discussão. **Objetivo:** O presente estudo possui o objetivo de investigar o padrão morfológico de almofadas foliares de licófitas preservadas no afloramento Morro do Papaléo, município de Mariana Pimentel, Permiano Inferior do Rio Grande do Sul. **Procedimentos metodológicos:** Para tanto, impressões caulinares de licófitas subarborescentes foram extraídas do Nível 8 deste afloramento. Tal nível fossilífero está inserido na Formação Rio Bonito, Permiano Inferior da Bacia do Paraná. Os exemplares coletados foram investigados e fotografados por meio de estereomicroscópio com câmera acoplada (Leica EZ4D). **Resultados:** Com base nestas análises foi possível observar que as almofadas foliares estão dispostas em filotaxia lepidodendroide, possuem formato fusiforme (2,3 por 4,0 mm) e apresentam extensões sigmoides em sua parte superior e basal. Não foi observada a presença de abscisão foliar, lígula e paricnos. Estas características são típicas da morfoespécie *Brasilodendron pedroanum*. Entretanto, uma grande gama de variações na morfologia das almofadas foliares foi observada. Estas variações ainda estão sendo investigadas, porém, é possível inferir que elas representam diferentes graus de decorticação caulinar gerados durante o processo tafonômico. **Conclusão:** Desta forma, é necessária a revisão das características morfológicas destas plantas, pois a mesma espécie pode apresentar diversos padrões morfológicos de almofadas foliares, o que pode acarretar em definições taxonômicas equivocadas e gerar uma interpretação incorreta da diversidade de plantas durante o Permiano Inferior da Bacia do Paraná.

Palavras-chave: Licófitas arborescentes. Licófitas subarborescentes. Morfologia de almofadas foliares. Gondwana ocidental. Paleozoico superior

ISBN 978-85-8167-176-5

ANEXO O – Resumo publicado em coautoria (2016)

*ANÁLISES MORFOLÓGICAS DE LICÓFITAS SUBARBORESCENTES
DO AFLORAMENTO MORRO DO PAPALÉO, PERMIANO INFERIOR
DA BACIA DO PARANÁ*



Centro Universitário UNIVATES

Reitor: Prof. Me. Ney José Lazzari

Vice-Reitor e Presidente da Fuvates: Prof. Dr. Carlos Candido da Silva Cyrne

Pró-Reitora de Pesquisa, Extensão e Pós-Graduação: Profa. Dra. Maria Madelena Dullius Pró-Reitora de

Ensino: Profa. Ma. Luciana Carvalho Fernandes

Pró-Reitora de Desenvolvimento Institucional: Profa. Dra. Júlia Elisabete Barden Pró-Reitor

Administrativo: Prof. Me. Oto Roberto Moerschbaeher



Editora Univates

Coordenação e Revisão Final: Ivete Maria Hammes Editoração: Glauber

Röhrig e Marlon Alceu Cristófoli Capa: Setor de Marketing e Comunicação

da Univates

Conselho Editorial da Editora Univates

Titulares

Adriane Pozzobon

Marli Teresinha Quartieri

Rogério José Schuck

Fernanda Cristina Wiebusch Sindelar

Suplentes

Fernanda Rocha da Trindade

Ieda Maria Giongo

João Miguel Back

Alexandre André Feil

Avelino Tallini, 171 - Bairro Universitário - Lajeado - RS, Brasil

Fone: (51) 3714-7024 / Fone/Fax: (51) 3714-7000

editora@univates.br / <http://www.univates.br/editora>

S159 Salão de Iniciação Científica Tecnológica e de Inovação (15.: 2016 :
Lajeado, RS)

Anais da XV Salão de Iniciação Científica Tecnológica e de Inovação,
18 de outubro de 2016, Lajeado, RS / Maria Madalena Dullius (Coord.) -
Lajeado : Editora da Univates, 2016.

147 p.

ISBN 978-85-8167-185-7

1. Iniciação Científica 2. Anais I. Título

CDU: 001.891:061.3



ISBN 978-85-8167-185-7

Modalidade: Bolsista de Iniciação Científica da Univas

Área de conhecimento:

Autor(es): Rafael Spiekermann, José Rafael Wanderley Benício, Joseline Manfro, Dieter Uhl, André Jasper **Apresentador(es):** Rafael Spiekermann **Orientador(a):** André Jasper

ANÁLISE MORFOLÓGICA DE LICÓFITAS SUBARBORESCENTES DO AFLORAMENTO MORRO DO PAPALÉO, PERMIANO INFERIOR DA BACIA DO PARANÁ

Resumo: Embora atualmente representadas por um modesto grupo de plantas herbáceas, as licófitas atingiram formas arborescentes e desempenharam um importante papel ecológico durante o Paleozoico. Estas plantas surgiram no final do Siluriano, há aproximadamente 420 m.a. atrás, sendo que atingiram seu apogeu durante o Carbonífero Superior (aproximadamente 310 m.a. atrás), onde alcançaram grandes dimensões e formaram extensas florestas tropicais na província Euroamericana. No Gondwana, licófitas arborescentes e subarborescentes colonizaram os ambientes pós-glaciais do Permiano Inferior (aproximadamente 290 m.a. atrás), sendo que diversas morfoespécies foram descritas para este período. Tais descrições taxonômicas estão baseadas especialmente na morfologia de almofadas foliares, que correspondem a porção basal do micrófilo que permanece preservada no córtex externo do caule mesmo após abscisão foliar. Estas almofadas recobrem os caules de licófitas arborescente e subarborescentes, fornecendo diversas informações taxonomicamente relevantes, como presença ou não de cicatriz foliar, feixe vascular, paricnos e lígula. Entretanto, a grande maioria das taxas de licófitas gondwânicas é descrita com base em fósseis incompletos e mal preservados, sendo desta forma a definição do padrão morfológico das almofadas foliares e, conseqüentemente, a taxonomia destas plantas uma enigmática discussão. Com base nesta problemática, o presente estudo possui o objetivo de investigar o padrão morfológico de almofadas foliares de licófitas preservadas na porção superior do afloramento Morro do Papaléo, município de Mariana Pimentel, Permiano Inferior do estado do Rio Grande do Sul. Para tanto, 160 impressões caulinares de licófitas subarborescentes foram mecanicamente extraídas do Nível 8 deste afloramento, o qual é rico em diferentes registros fitofossilíferos e está descrito como geologicamente inserido na Formação Rio Bonito, Bacia do Paraná. Os exemplares coletados foram investigados e fotografados por meio de estereomicroscópio com câmera acoplada (Leica EZ4D), no Laboratório de Luparia e Microscopia Digital do Setor de Botânica e Paleobotânica da Univas. Com base nestas análises foi possível observar que as almofadas foliares estão dispostas em filotaxia lepidodendroide, possuem formato fusiforme e apresentam extensões sigmoides em sua parte superior e basal. Seu tamanho médio é 2,3 mm de comprimento por 4,0 mm de largura. Não foi observada a presença de abscisão foliar, lígula e paricnos. Estas características são típicas da morfoespécie *Brasilodendron pedroanum*. Entretanto uma grande gama de variações na morfologia das almofadas foliares foi observada. Estas variações ainda estão sendo investigadas, porém, foi possível inferir que elas representam diferentes graus de decorticação dos caules destes organismos, o que pode ter sido gerado pelos processos tafonômicos relacionados à sua deposição. Assim, confirma-se que é necessária a revisão em detalhe de algumas das características morfológicas atualmente utilizadas para a identificação de licófitas arborescentes e subarborescentes da área de estudo, tendo em vista que a mesma espécie pode apresentar diversos padrões morfológicos de almofadas foliares, o que pode acarretar em interpretações taxonômicas equivocadas. Tais incorreções podem, ainda, gerar uma interpretação incorreta da diversidade de

plantas durante o Permiano Inferior da Bacia do Paraná, gerando um aumento expressivo no número de espécies descritas.

Palavras-chave: Licófitas arborescentes. Licófitas subarborescentes. Morfologia de almofadas foliares. Gondwana Ocidental. Paleozoico Superior.

Instituição: Centro Universitário UNIVATES/Senckemberg Forschung Institute and Naturmuseum

Financiador: FUVATES/FAPERGS/CAPES/CNPq/Alexander von Humboldt Foundation

ANEXO P – Resumo publicado em coautoria (2017)

*NATURALISTA POR UM DIA: APROXIMANDO ALUNOS DE
ESCOLAS PÚBLICAS E PRIVADAS AO ENSINO DE
PALEONTOLOGIA*

PALEO RS 2017

BOLETIM DE RESUMOS

EDITORES

.....

HEITOR FRANCISCHINI
GIOVANA PEDROL DE FREITAS
EMMANUELLE FONTOURA MACHADO
DÉBORA DINIZ

REUNIÃO REGIONAL PALEO RS 2017

BOLETIM DE RESUMOS

EDITORES: Heitor Francischini, Giovana P. Freitas, Emmanuelle F. Machado e Débora Diniz

REALIZAÇÃO: Laboratório de Geologia e Paleontologia, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande

CONTATO: inscricoespaleors2017@gmail.com e resumos-paleors2017@gmail.com

SITE: <https://paleors2017.wixsite.com/paleors2017>

SOCIEDADE BRASILEIRA DE PALEONTOLOGIA (Gestão 2017-2019)

Presidente: Renato Pirani Ghilardi (UNESP)

Vice-Presidente: Annie Schmaltz Hsiou (USP)

1ª Secretária: Taissa Rodrigues Marques da Silva (UFES)

2º Secretário: Rodrigo Miloni Santucci (UnB)

1º Tesoureiro: Marcos César Bissaro Júnior (USP)

2º Tesoureiro: Átila Augusto Stock da Rosa (UFSM)

Diretor de Publicações: Sandro Marcelo Scheffler (Museu Nacional)



NATURALISTA POR UM DIA: APROXIMANDO ALUNOS DE ESCOLAS PÚBLICAS E PRIVADAS AO ENSINO DE PALEONTOLOGIA

G.F. LORENZON, J.R.W. BENÍCIO, G.S. REBELATO, A.S. BRUGNERA, C.I. ROCKENBACH, L.J. VARGAS, R. SPIEKERMANN, A. JASPER

Laboratório de Paleobotânica e Evolução de Biomas, Univates

gabriel.lorenzon@universo.univates.br, jose.benicio@universo.univates.br, gisele.rebelato@universo.univates.br, allana.brugnera@universo.univates.br, crockenbach2@universo.univates.br, leo.vargas@universo.univates.br, rspiekermann@universo.univates.br

O ensino da paleontologia é de extrema importância para que os alunos da educação básica desenvolvam uma percepção sobre a formação, desenvolvimento e evolução da vida na Terra. O projeto “Naturalista por um dia” é uma ação de inserção social desenvolvida pelo Museu de Ciências Naturais (MCN) da Universidade do Vale do Taquari – Univates, que engloba minicursos relacionados a diferentes áreas das ciências naturais, incluindo a paleontologia. Desenvolvido desde 2002, o projeto é constituído por oficinas ministradas por bolsistas de iniciação científica, sendo que mais de 12.000 alunos de escolas dos níveis Fundamental e Médio das redes pública e privada de diferentes regiões do Rio Grande do Sul. O Laboratório de Paleontologia e Evolução de Biomas (LPEB/MCN/Univates), é responsável pela oficina “... E a terra virou mar e o mar virou terra...”, onde busca-se contribuir para uma melhor formação do público-alvo, divulgando o trabalho científico desenvolvido pelo grupo de trabalho a ele vinculado. Além disso, pretende-se despertar o interesse dos jovens estudantes sobre a paleontologia com a utilização de atividades lúdicas (e.g. teatro interativo), práticas (e.g. manuseio e observação de fósseis) e teóricas (e.g. apresentação dos conceitos básicos como: O que é um fóssil, diferença entre paleontologia e arqueologia, dimensão de tempo e processos de fossilização.). Com o intuito de avaliar os potenciais impactos da atividade na compreensão da paleontologia por parte dos estudantes, pretende-se utilizar ferramentas (e.g. questionários, entrevistas) que permitam tal análise. Acredita-se que a oficina desperta o interesse dos estudantes acerca da paleontologia por, também, permitir o seu contato com bolsistas. Estes que relatam como é o dia-a-dia de trabalho em um laboratório de pesquisa, deixando os alunos mais informados e próximos do meio acadêmico e científico. [Universidade do Vale do Taquari, CNPq, FAPERGS]

ANEXO Q – Resumo publicado em coautoria (2017)

*PALEOWILDFIRES: USUAL EVENTS IN LATE
PALEOZOIC OF GONDWANA*



FACING HUMANIMPAIRS:
THE CHALLENGES FOR SOCIETY AND FOR SCIENCE

Paleowildfires: usual events late Paleozoic of Gondwana

Gonçalves, CV¹; Benício, JRW¹; Rebelato, GS¹; Brugnera, AS¹;
Rockenbach, CI; Vargas, LJ¹; Lorenzon, GF¹; Spiekerman, R¹; Jasper,
A^{1,2}; Uhl, D²

¹Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES, Lajeado/RS, Brazil,
biologacatia@univates.br;

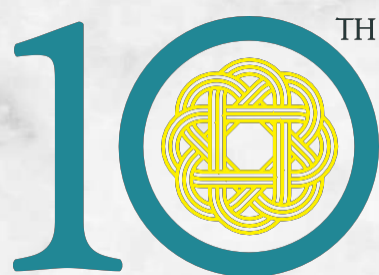
²Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum.

Macro-charcoal is widely accepted as a direct evidence of the occurrence of paleowildfires and, in Upper Paleozoic sediments of Euramerica and Cathaysia, records of these remains are relatively common and more or less homogeneously distributed. On the other hand, only recently the records for the Gondwana increased. The studies demonstrated that, like Cathaysia, paleowildfires were also common in the Late Paleozoic of the continent. The most important Gondwanic records are related specially to coal bearing strata and are spread out in different sequences and stratigraphic intervals in the Permian. The records occur on Cool- Temperate areas [e.g. Paraná Basin (Sakmarian/Artinskian of Brazil), Karoo Basin (Guadalupian of South Africa), Damodar Valley Basin (Lopingian of India)]. The abundance of evidences for Permian macro-charcoal in Southern Permian areas, seems to prove that paleowildfires occurred at different spatial and temporal scales during the course of the Permian in Gondwana, during the transition from a cold to cool and warm climate interval. The estimated high atmospheric oxygen concentration which peaked during the Early Permian probably made vegetation highly flammable even under wet conditions. The macroscopic charcoal remains confirmed that paleowildfires occurred in high latitudes and promptly after the deglaciation. The scarcity of charcoal remains after the cessation of peat deposition in the warm topmost Permian, besides estimations of elevated O₂ levels until at least the latest Permian could be attributed to climatic change that may bring about directional changes in the frequencies and magnitude of these fire events. Furthermore, the high incidence of charcoal indicates that the paleoenvironmental conditions in Western and Eastern Gondwana during the Late Paleozoic were adequate for fire occurrence.

FAPERGS, CAPES, CNPq, Alexander von Humboldt Foundation.

ANEXO R – Resumo publicado em coautoria (2018)

*A REMARKABLE MASS-ASSEMBLAGE OF THE LYCOPSID BRASILODENDRON
PEDROANUM CHALONER ET AL. 1979 FROM THE RIO BONITO FORMATION,
LOWER PERMIAN OF THE PARANÁ BASIN, RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL*



EUROPEAN PALAEOBOTANY & PALYNOLOGY CONFERENCE



University College Dublin, Ireland
12-17 August 2018



A REMARKABLE MASS-ASSEMBLAGE OF THE LYCOPSID *BRASILODENDRON PEDROANUM* CHALONER ET AL. 1979 FROM THE RIO BONITO FORMATION, LOWER PERMIAN OF THE PARANÁ BASIN, RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL

Rafael Spiekermann¹, Dieter Uhl², José Rafael Wanderley Benício¹, André Jasper¹

¹Univates, Lajeado, Brazil. ²Senckenberg Research Institute and Natural History Museum, Frankfurt am Main, Germany

In Brazil, arborescent and sub-arborescent lycopsids are considered as important floristic components of the early Permian peat-forming vegetation of the Paraná Basin and have generally been assigned to *Brasilodendron pedroanum* Chaloner et al. 1979. However, fossil genera such as *Lycopodiophloios* and *Cyclodendron* have also been described from the lower Permian deposits of the Paraná Basin. These plants are mostly preserved as impressions and compressions, which are very fragmented, incompletely preserved and lack reproductive structure. Consequently, the taxonomy and systematic position as well as the biology and ecology of the early Permian arborescent and sub-arborescent lycopsids from Brazil are still poorly understood.

During recent fieldwork a remarkable mass assemblage of *Brasilodendron pedroanum* axes has been discovered. These axes are preserved in the plant bearing sub-level N8b of the Morro do Papaléo outcrop, Rio Bonito Formation, early Permian of the Paraná Basin, Rio Grande do Sul state, Brazil. They are massively concentrated, without any preferential depositional orientation, forming a monotypical assemblage. They are unbranched and preserved as impressions. Three morphological patterns, occurring on distinct axes, were described for leaf cushions. This mass-assemblage is probably a result of allochthonous deposition and hydraulic size-sorting. The massive concentration of *Brasilodendron pedroanum* suggests that this fossil taxon was an important floristic element somewhere in the upstream area of the braided river system preserved in the Morro do Papaléo outcrop.

ANEXO S – Resumo publicado em coautoria (2018)

*PRESENCE DE MACRO-CHARCOAL ASSOCIADO A INERTINITAS EM
NÍVEIS SUCESSIVOS DO AFLORAMENTO CURVA DO BELVEDERE,
PERMIANO INFERIOR DA BACIA DO PARANÁ, BRASIL*

ISSN 3025-0121

Boletín de la Asociación Latinoamericana de Paleobotánica y Palinología

Número 18 | 2018



XVII Simposio Argentino de Paleobotánica y Palinología



XVII Simposio Argentino de Paleobotánica y Palinología

“Hacia nuevos desafíos”

INSTITUCIONES ORGANIZADORAS



Universidad Autónoma
de Entre Ríos



C I C Y T T P

Boletín de la Asociación Latinoamericana de Paleobotánica y Palinología

Revista científica de la asociación. Inició su publicación en 1973 con el objetivo de proveer un canal formal de comunicación y disseminación de investigaciones científicas que colaboren con el avance del conocimiento en Paleobotánica y Palinología.

<http://alpaleobotanicapalinologia.blogspot.com.ar>

<http://www.ufrgs.br/alpp>

PRESENÇA DE *MACRO-CHARCOAL* ASSOCIADO A INERTINITAS EM NÍVEIS SUCESSIVOS DO AFLORAMENTO CURVA DO BELVEDERE, PERMIANO INFERIOR DA BACIA DO PARANÁ, BRASIL

C.I. Rockenbach¹, J.R.W. Benício¹, R. Spiekermann¹, A. Brugnera¹, G.F.Lorenzon¹, D. Uhl ² e A. Jasper^{1,2*}

¹Universidade do Vale do Taquari. 95914-014, Lajeado, Brasil crockenbach2@universo.univates.br

²Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum Frankfurt. Frankfurt, Germany

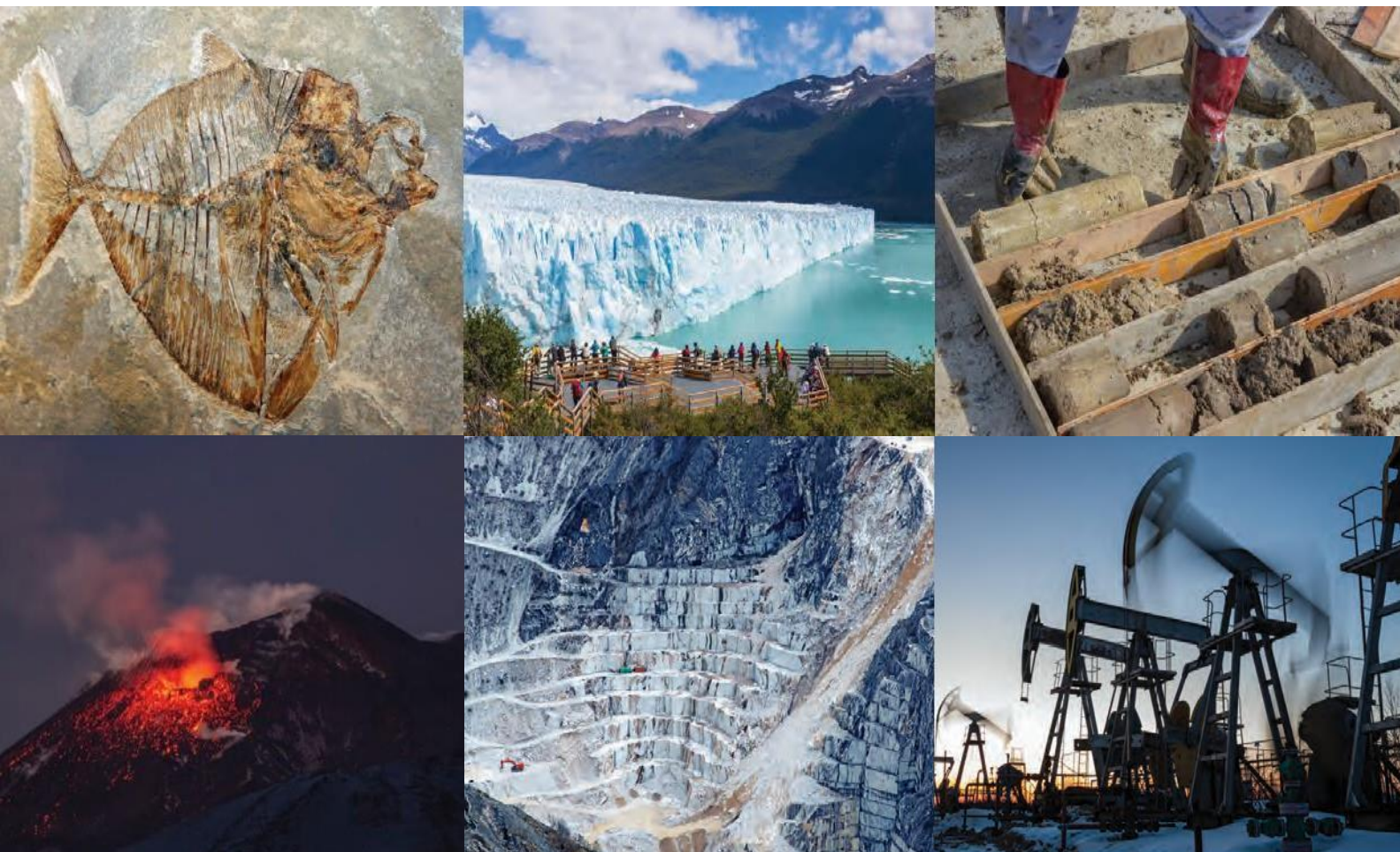
A ocorrência de incêndios vegetacionais para o período Permiano podem ser comprovadas pela ocorrência de *macro-charcoal* em diferentes níveis sedimentares da Bacia do Paraná. Todavia, a presença de inertinitas (macerais detectados em análises petrográficas e advindos de fragmentos de plantas) em níveis de carvão tem gerado discussões acerca de sua origem pirogênica. Estudo realizado em material da Formação Barakar (Cisulariano), Bacia de South Rewa, Índia, demonstrou que sedimentos com presença de *macro-charcoal* do Gondwana também apresentam altas concentrações de inertinitas.

Porém, estudos comparativos para os estratos da Bacia do Paraná ainda são restritos. Com o objetivo de contribuir para discussão acerca origem pirogênica das inertinitas gondwânicas, o presente estudo avaliou a presença destes macerais em diferentes níveis do Afloramento Curva do Belvedere, Rio Grande do Sul, Brasil. Os níveis estudados são ricos em *macro-charcoal* e as concentrações de inertinitas são igualmente altas. A características anatômicas do *macro-charcoal* encontrado permite uma associação ao morfotipo *Agathoxylon*, o qual representa um amplo espectro de grupos taxonômicos da flora gimnospérmica do Permiano do Gondwana, incluindo as glossopterídeas. Considerando as altas concentrações de inertinitas nos carvões gondwânicos, é possível inferir que os ambientes de turfeiras responsáveis pela formação dessas camadas ao longo do Paleozoico tardio estiveram submetidos a paleoincêndios de forma constante.

Projeto subsidiado por UNIVATES, CNPq, CAPES, FAPERGS.

ANEXO T – Resumo publicado em coautoria (2018)

TAXONOMY AND TAPHONOMY OF A REMARKABLE LYCOPSID MASS-ASSEMBLAGE FROM THE MORRO DO PAPALEO OUTCROP (RIO BONITO FORMATION, LOWER PERMIAN, PARANÁ BASIN, RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL)



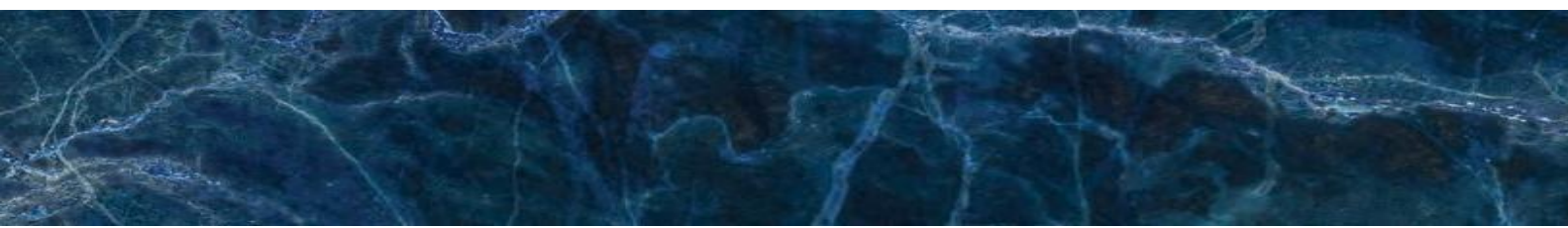
GEOBONN 2018

2–6 September 2018 | Bonn | Germany



Living Earth

Abstracts



Taxonomy and taphonomy of a remarkable lycopsid mass-assemblage from the Morro do Papaleo outcrop (Rio Bonito Formation, lower Permian, Paraná Basin, Rio Grande do Sul, Brazil)

Rafael Spiekermann¹, José Rafael Wanderley Benício¹, André Jasper¹, Dieter Uhl²

¹UNIVATES, RS, Brasil, ²Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum Frankfurt, Germany

In Brazil, arborescent and sub-arborescent lycopsids are considered as important floristic components of the early Permian peat-forming vegetation of the Paraná Basin and have generally been assigned to *Brasilodendron pedroanum* Chaloner et al. 1979. However, fossil genera such as *Lycopodiophloios* and *Cyclodendron* have also been described from the lower Permian deposits of the Paraná Basin. These plants are mostly preserved as impressions and compressions, which are very fragmented, incompletely preserved and lack reproductive structure. Consequently, the taxonomy and systematic position as well as the biology and ecology of the early Permian arborescent and sub-arborescent lycopsids from Brazil are still poorly understood. During recent fieldwork a remarkable mass assemblage of *Brasilodendron pedroanum* axes has been discovered. These axes are preserved in the plant bearing sub-level N8b of the Morro do Papaleo outcrop, Rio Bonito Formation, early Permian of the Paraná Basin, Rio Grande do Sul state, Brazil. They are massively concentrated, without any preferential depositional orientation, forming a monotypical assemblage. They are unbranched and preserved as impressions. Three morphological patterns, occurring on distinct axes, were described for leaf cushions. This mass-assemblage is probably a result of allochthonous deposition and hydraulic size-sorting, within an 80 cm thick, fluvially (re-)deposited ash layer/tuffite. The massive concentration of *Brasilodendron pedroanum* suggests that this fossil taxon was an important floristic element somewhere in the upstream area of the braided river system preserved in the Morro do Papaleo outcrop.

ANEXO U – Resumo publicado em coautoria (2018)

*DELIMITAÇÃO TAXONÔMICA E INTERPRETAÇÃO TAFONÔMICA DE UMA
ASSOCIAÇÃO DE LICÓFITAS DO PERMIANO INFERIOR DA BACIA DO
PARANÁ, RIOGRANDE DO SUL, BRASIL*

ISBN 978-85-8167-256-4

Anais do II Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Conhecimento

21 e 22 de junho



ISBN 978-85-8167-256-4

Maria Madalena Dullius
(Coord.)

Anais do II Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Conhecimento

1ª edição



EDITORA
UNIVATES

Lajeado, 2018



**Universidade do Vale do
Taquari - Univates Reitor:**

Prof. Me. Ney José Lazzari

Vice-Reitor e Presidente da Fuvates: Prof. Dr. Carlos Cândido da Silva Cyrne

Pró-Reitora de Pesquisa, Extensão e Pós-Graduação: Profa. Dra. Maria Madalena Dullius

Pró-Reitora de Ensino: Profa. Dra. Fernanda Storck Pinheiro

Pró-Reitora de Desenvolvimento Institucional: Profa. Dra. Júlia Elisabete Barden

Pró-Reitor Administrativo: Prof. Me. Oto Roberto Moerschbaeher



EDITORA
UNIVATES

Editora Univates

Coordenação: Ana Paula Lisboa Monteiro

Editoração e capa: Glauber Röhrig e Marlon Alceu Cristófoli

Conselho Editorial da Editora Univates

Titulares

Alexandre André Feil

Fernanda Rocha da Trindade

Suplentes

Fernanda Cristina Wiebusch Sindelar

Adriane Pozzobon João Miguel Back

R

ogério José Schuck

Sônia Elisa Marchi Gonzatti

Evandro Franzen

Avelino Tallini, 171 – Bairro Universitário –

Lajeado – RS, Brasil Fone: (51) 3714-7024 /

Fone: (51) 3714-7000, R.: 5984

editora@univates.br / <http://www.univates.br/editora>

C749 Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Conhecimento (2. : 2018 :
Lajeado, RS)

Anais do II Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Conhecimento
– 21 e 22 de junho de 2018, Lajeado, RS / Maria Madalena Dullius (Coord.) –
Lajeado : Ed. da Univates, 2018.

247 p.

ISBN 978-85-8167-256-4

1. Pesquisa científica. 3 Anais. I. Dullius, Maria Madalena. II. Título

CDU: 001.891

Catálogo na publicação (CIP) –
Biblioteca da Univates
Bibliotecária Andrieli Mara
Lanferdini – CRB 10/2279

Nome dos autores: Rafael Spiekermann

Demais participantes: Dieter Uhl, José Rafael W. Benício, Margot Guerra-Sommer Orientador: André Jasper

Nome da Instituição: Universidade do Vale do Taquari - Univates Área de conhecimento: Ciências Exatas e da Terra

DELIMITAÇÃO TAXONÔMICA E INTERPRETAÇÃO TAFONÔMICA DE UMA ASSOCIAÇÃO DE LICÓFITAS DO PERMIANO INFERIOR DA BACIA DO PARANÁ, RIOGRANDE DO SUL, BRASIL

Resumo: Licófitas arborescentes e sub-arborescentes são consideradas importantes elementos florísticos dos ambientes pós-glaciais do Permiano Inferior do Gondwana. Entretanto, em função de seu registro fóssil ser fragmentado, lacunas relacionadas a taxonomia, biologia e ecologia deste grupo de plantas permanecem. O presente estudo possuiu o objetivo de delimitar a taxonomia e interpretar a tafonomia de uma associação de licófitas fósseis preservada no afloramento Morro do Papaléo, município de Mariana Pimentel, Rio Grande do Sul, Brasil. Para tanto, analisou-se as características deposicionais e coletou-se 150 fósseis de licófitas do nível 8b do afloramento, que está inserido na Formação Rio Bonito, Permiano Inferior da Bacia do Paraná. Os fósseis coletados foram morfológicamente analisados sob estereomicroscópio no Laboratório de Paleobotânica e Evolução de Biomas da Universidade do Vale do Taquari- Univates. Além disto, medições morfométricas (tamanho das almofadas foliares, distância entre almofadas foliares, filotaxia e espessura e comprimento dos caules) foram realizadas em todos os fósseis com o uso de paquímetro digital. Com o intuito de comparar estas medidas, os dados obtidos por meio das análises morfométricas foram submetidos aos testes de estatística multivariada PERMANOVA e PCA. Tamanho das almofadas foliares e comprimento dos fósseis não foram incluídos nestas análises estatísticas, pois estes encontram-se preservados de maneira incompleta em diversos espécimes. Por meio destes procedimentos, definiu-se que a associação fóssil do subnível N8b é majoritariamente composta por impressões de licófitas, que estão massivamente concentradas e homogeneamente distribuídas sem nenhuma orientação deposicional preferencial. Estes fósseis possuem largura completa (12,6 mm a 46,0 mm) e comprimento incompleto (24,6 mm a 460,0 mm), e estão cobertos por almofadas foliares distribuídas em filotaxia lepidodendróide, que apresentam falsas cicatrizes foliares e não apresentam lígula e parícnos. Apesar de apresentarem características em comum, três diferentes padrões morfológicos de almofadas foliares foram observados em fósseis distintos. Entretanto, o PERMANOVA demonstrou que não existe diferença estatística significativa entre as medidas morfométricas dos três diferentes padrões morfológicos de almofadas foliares ($p = 0,6917$), e o PCA revelou a ausência de agrupamentos distintos entre os dados, demonstrando que existe grande similaridade estatística entre a morfometria dos fósseis. Além disso, três fósseis apresentando transição entre os diferentes padrões morfológicos de almofadas foliares comprovam que todo o material estudado pertence a um único táxon-fóssil, *Brasilodendron cf. pedroanum*. Estes diferentes padrões morfológicos de almofadas foliares provavelmente são oriundos de processos de decorticação e alterações tafonômicas. Esta massiva associação de licófitas fósseis foi formada por meio de transporte e seccionamento em um fluxo hídrico decrescente, que culminou em uma deposição alóctone. Embora alóctone, a expressiva concentração de *Brasilodendron cf. pedroanum*, indica que este táxon-fóssil foi um significativo elemento florístico em áreas localizadas acima do paleoambiente preservado no Morro do Papaléo.

Palavras-chave: Gondwana. Formação Rio Bonito. Licófitas sub-arborescentes.

ANEXO V – Resumo publicado (2018)

*EVENTOS CÍCLICOS DE PALEOINCÊNDIOS NA CAMADA BARRO
BRANCO, PERMIANO INFERIOR DO ESTADO DE SANTA CATARINA,
BRASIL*

Nome dos autores: José Rafael Wanderley Benício

Demais participantes: Rafael Spiekermann; Etienne Fabbrin Pires, Dieter Uhl Orientador: André

Jasper Nome da Instituição: Universidade do Vale do Taquari - Univates Área de
conhecimento: Ciências Exatas e da Terra

EVENTOS CÍCLICOS DE PALEOINCÊNDIOS NA CAMADA BARRO BRANCO, PERMIANO INFERIOR DO ESTADO DE SANTA CATARINA, BRASIL

Resumo: O fogo é uma rápida reação química oxidativa que apresenta uma influência importante na dinâmica, modificação e evolução dos ecossistemas vegetais terrestres, pelo menos desde o Siluriano, quando as plantas vasculares começaram a dominar o ambiente terrestre. Nas últimas três décadas foram relatadas variações significativas na frequência e intensidade dos incêndios em vários ecossistemas modernos, e alterações expressivas na dinâmica dos regimes de fogo são projetadas para diversas regiões do mundo devido às mudanças climáticas globais. Os estudos sobre os efeitos de climas em ambientes passados são extremamente significativos, pois podem melhorar nossa compreensão dos impactos das mudanças climáticas na ocorrência de incêndios florestais naturais e suas consequências para a biodiversidade e os ecossistemas. Para tornar possível o estudo dos paleoincêndios vegetacionais em diferentes momentos da história da Terra, utiliza-se como ferramenta o carvão vegetal macroscópico, considerado indicativo direto das ocorrências destes eventos. Desta forma, com o intuito de contribuir para a compreensão dos eventos associados à dinâmica ambiental do Permiano, o presente estudo investigou a ocorrência de paleoincêndios vegetacionais em seis níveis de carvão da camada Barro Branco Permiano Inferior do estado de Santa Catarina, Formação Rio Bonito, Bacia do Paraná. As amostras coletadas foram submetidas a análises em estereomicroscópio (Zeiss Stemi 2000C) no laboratório do Setor de Paleobotânica e Evolução de Biomas vinculado ao Museu de Ciências Naturais (Univates). Os fragmentos que apresentaram características de carvão vegetal macroscópico foram extraídos mecanicamente das rochas com auxílio de pinças e agulhas histológicas e montados sobre stubs, e posteriormente analisados sob microscópio eletrônico de varredura (Zeiss EVO LS15) disponível no Parque Científico e Tecnológico do Vale do Taquari (TECNOVATES). Com base nas imagens obtidas sob MEV, foram definidas as características anatômicas mais relevantes observadas (e.g. morfologia e distribuição dos traqueídeos, grau de conservação/degradação das paredes celulares e presença de outros tipos de tecidos vegetais preservados). Por meio destas análises foi possível comprovar a presença de carvão vegetal macroscópico para os seis níveis de carvão estudados. As comparações anatômicas, sugerem afinidades gimnospermicas por apresentarem características como (e.g. traqueídeos simples, pontuações uniseriadas). Estes dados permitem sugerir que os eventos de paleoincêndios vegetacionais na área eram sucessivos durante a deposição dos níveis formadores de turfeiras.

Palavras-chave: Gondwana. Formação Rio Bonito. Reconstruções paleoambientais



UNIVATES

R. Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09